

CONTROL AUTOMÁTICO Y MANDO DE UN SISTEMA
ELECTROMECAÁNICO PARA PRODUCCIÓN DE ANILLOS EN FIBRA
DE CARBONO POR HILADO

NICOLÁS GARCÍA PARDO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2018

CONTROL AUTOMÁTICO Y MANDO DE UN SISTEMA
ELECTROMECAÁNICO PARA PRODUCCIÓN DE ANILLOS EN FIBRA
DE CARBONO POR HILADO

NICOLÁS GARCÍA PARDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico en la
Universidad del Valle

DIRECTOR: CARLOS RAFAEL PINEDO JARAMILLO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2018

DEDICATORIA

Este documento va dirigido en primer lugar a mi madre, que siempre me ha alentado a ser un buen estudiante, a no rendirme ante las dificultades que van surgiendo a lo largo de la vida y siempre seguir mis ideales.

A mis hermanos y padrastro, quienes me han dado su apoyo incondicional y son parte del hogar al que pertenezco y el cual aprecio mucho y me motiva a ser cada vez mejor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Carlos Pinedo por darme la oportunidad de trabajar con la máquina bobinadora de hilos, por guiarme a lo largo de este proceso de trabajo de grado y por mostrarme siempre su voluntad de ayudar y finalizar el trabajo lo más rápido posible y de la mejor manera.

Al profesor Gonzalo Casanova por instruirme en el estado actual de la máquina, brindarme el espacio en el laboratorio para trabajar de la mejor manera y también facilitarme información y referirme a personas que me pudieron ayudar a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Bobinado de Filamentos	4
1.2. Patrones de bobinado de filamentos.....	5
1.3. Fibra de carbono.....	6
1.4. Resina	9
2. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA.....	10
2.1. Sistema de rotación del molde.....	10
2.1.1. Molde del anillo	10
2.2. Sistema de alimentación de fibra y tensión	12
2.3. Sistema de soporte.....	13
2.4. Sistema eléctrico y de control	13
2.5. Proceso e incidencia de parámetros de fabricación	22
3. CONTROL DEL CARRO MOVIL Y EL MANDRIL.....	25
3.1. Velocidad del mandril	25
3.2. Velocidad del carro móvil.....	26
3.3. Implementación del sistema informático IPOSplus	27
3.4. Prueba de funcionamiento	37
3.5. Lectura de temperatura.....	37
4. CONTROL DEL SISTEMA DE TENSIÓN.....	40
4.1. Conexión y acondicionamiento de la celda de carga	40
4.2. Ajuste de los parámetros PID del variador de frecuencia MDX61B0022 ..	45
4.3. Implementación en IPOSplus.....	47
4.4. Ajuste del controlador mediante método de Ziegler-Nichols	49
4.5. Ajuste del controlador mediante método heurístico.....	51
5. INTERFAZ GRÁFICA	54
5.1. Panel de configuración inicial.....	55
5.2. Panel de configuración de curado.....	56

5.3. Panel de estado actual	56
5.4. Panel de control.....	58
6. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL ANILLO Y RESULTADOS....	60
6.1. Materiales requeridos y descripción del proceso	60
6.2. Resultados de pruebas mecánicas	63
6.3. Características finales de los anillos	69
6.4. Comparación entre anillos	70
6.5. Estimación de tiempo de producción y gasto de material por anillo.	72
7. CONCLUSIONES.....	74
8. TRABAJO FUTURO	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características del motor de frenado de las fibras.	14
Tabla 2.2. Características del motor del tornillo.	14
Tabla 2.3. Características del motor del sistema de rotación.	14
Tabla 2.4. Elementos iniciales de la máquina bobinadora de hilos.	20
Tabla 2.5. Rangos de parámetros de fabricación establecidos.	24
Tabla 3.1. Radio del molde con los que cuenta la máquina.	26
Tabla 3.2. Velocidades del carro móvil para un ángulo de bobinado de 89°.	27
Tabla 3.3. Rangos para las entradas analógicas AI1 – AI2 [25].	39
Tabla 3.4. Rangos manejados en la lectura de temperatura.	39
Tabla 4.1. Valores medidos en la salida del regulador de tensión.	42
Tabla 4.2. Ajuste realizado en el acondicionador.	43
Tabla 4.3. Ajuste PID mediante el método Ziegler-Nichols [28].	49
Tabla 4.4. Respuesta del sistema en tensión para diferentes setpoints.	52
Tabla 4.5. Comparación antes y después para 20N y 5N.	53
Tabla 6.1. Parámetros de fabricación usados en [21] y en el trabajo actual.	63
Tabla 6.2. Valores de carga y precarga para pruebas de rigidez en los anillos.	65
Tabla 6.3. Resultados de la prueba de flexión.	66
Tabla 6.4. Resultados de la prueba de compresión radial.	67
Tabla 6.5. Resultados de la prueba de ruptura.	68
Tabla 6.6. Características finales de los anillos.	69
Tabla 6.7. Resultados a pruebas mecánicas de anillos realizados en 2012 [21]. ...	70
Tabla 6.8. Comparación de resultados entre anillos hechos en 2012 y 2017.	70
Tabla 6.9. Costo de materia prima por anillo.	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Bobinado de filamentos [1].....	4
Figura 1.2. Bobinado en aro [4].....	5
Figura 1.3. Bobinado Helicoidal [4]	6
Figura 1.4. Bobinado polar [4].....	6
Figura 1.5. Mód. vs res. de tracción para fibras PAN y brea comerciales [6].....	8
Figura 2.1. Sistema de rotación de molde [12].....	10
Figura 2.2. Cara frontal y trasera de la primera tapa del molde.	11
Figura 2.3. Cara frontal y trasera de la segunda tapa del molde.	11
Figura 2.4. Elementos del molde.	12
Figura 2.5. Sistema de alimentación de fibra [12]	12
Figura 2.6. Sistema de soporte de la máquina [12].....	13
Figura 2.7. Variador de frecuencia MDX61B tamaño 1 [13].	15
Figura 2.8. Variador de frecuencia LTE-B [14].....	16
Figura 2.9. RTD 805 [15].	17
Figura 2.10. Pistola de calor STEINEL [16].....	18
Figura 2.11. Transmisor de temperatura [17].	18
Figura 2.12. Celda de carga TML TCLZ 2KNA [18].....	19
Figura 2.13. Acondicionador de señal DRF-LC 230VAC 20MV [19].....	19
Figura 2.14. Conexión de equipos de control y potencia.....	21
Figura 2.15. Diagrama de flujo el proceso de bobinado de hilos.	22
Figura 3.1. Movimiento lineal del carro móvil.	25
Figura 3.2. Distribución de memoria en IPOSplus compiler.	28
Figura 3.3. Definición de variables y estructuras en IPOSplus compiler.....	29
Figura 3.4. Inicialización de variables y estructuras.	30
Figura 3.5. Telegrama de datos para 3 palabras del dato de proceso [26].....	31
Figura 3.6. Habilitación de variadores esclavo, reseteo de variables.	31
Figura 3.7. Tarea para actualizar velocidad del molde y carro móvil.	32
Figura 3.8. Ubicación del carro móvil en la posición inicial del proceso.	33
Figura 3.9. Implementación del estado de parada y el estado de bobinado.....	34
Figura 3.10. Implementación del estado de curado y el estado de reset.....	35

Figura 3.11. Diagrama de flujo del programa en el variador MDX61B0015.....	36
Figura 3.12. Resultados de bobinado con cabuya para un ángulo de 89.	37
Figura 3.13. Esquema de conexión de la RTD 805 [17].	38
Figura 3.14. Bornes de entrada analógicas para un MOVIDRIVE B [13].	38
Figura 4.1. Circuito regulador de tensión de 12V en proteus 8.3 SP2.	40
Figura 4.2. Diseño de la PCB en ARES, herramienta de proteus 8.3 SP2.	41
Figura 4.3. Izq: modelo del circuito en 3D, der: circuito montado en PCB.	41
Figura 4.4. Potenciómetros y puentes de ajuste del acondicionador DRF-LC [27]	42
Figura 4.5. Conexión de celda de carga al variador MDX61B0022.	43
Figura 4.6. Componente de offset en la celda de carga.	44
Figura 4.7. Componente de offset eliminada en la lectura de la celda de carga....	45
Figura 4.8. Configuración de los parámetros generales del controlador PID.	45
Figura 4.9. Configuración de los parámetros de entrada del controlador PID.	46
Figura 4.10. Configuración de los límites del controlador PID.	47
Figura 4.11. Declaración de estructuras y variables en el variador MDX61B0022.	47
Figura 4.12. Reseteo de la salida de componentes del controlador PID.	48
Figura 4.13. Ciclo principal de operación para sistema de Tensión.	48
Figura 4.14. Diagrama de bloques para el sistema de tensión.....	49
Figura 4.15. Oscilaciones sostenidas con fibra de carbono.	50
Figura 4.16. Respuesta del sistema con fibra de carbono para un controlador PI.	50
Figura 4.17. Respuesta del sistema en tensión para un setpoint de 20 N.	51
Figura 4.18. Respuesta del sistema en tensión para diferentes setpoints.	52
Figura 4.19. Tensión para polea en cubeta de resina frenada y móvil [21].	53
Figura 5.1. Interfaz gráfica de usuario.....	54
Figura 5.2. Panel de configuración inicial.....	55
Figura 5.3. Panel de configuración de curado.	56
Figura 5.4. Panel de estado actual.	57
Figura 5.5. Panel de control.	58
Figura 5.6. Flujo de variables entre la interfaz de usuario y el variador maestro. ..	59
Figura 6.1. Posición de la fibra de carbono en la máquina bobinadora [21].	60
Figura 6.2. Configuración inicial en la interfaz de usuario.	61

Figura 6.3. Anillo recién sacado del molde.	62
Figura 6.4. Torneado del anillo y resultado final.	62
Figura 6.5. Línea de carga vs tiempo.	64
Figura 6.6. Curva de carga vs desplazamiento.	64
Figura 6.7. Ubicación del anillo para la prueba de flexión.	65
Figura 6.8. Ubicación del anillo para la prueba de compresión radial.	66
Figura 6.9. Prueba de ruptura.	67
Figura 6.10. Ubicación del anillo para la prueba de ruptura.	68
Figura 6.11. Ruptura de las fibras.	69
Figura 6.12. Comparación de rigidez en la prueba de flexión.	71
Figura 6.13. Comparación de rigidez en la prueba de compresión radial.	71
Figura 6.14. Comparación de rigidez entre anillos comerciales [30].	72

RESUMEN

Este documento describe una solución de ingeniería, desarrollada como trabajo de grado, para permitir el funcionamiento controlado de una máquina de hilado de fibras de carbono, ubicada en el Laboratorio de Ensayos Dinámicos y Materiales Fibrorreforzados, perteneciente al programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle.

La máquina se usa para construir elementos estructurales, configurados como sólidos de revolución (anillos y tubos), empleando materiales fibrorreforzados basados en fibras de carbono o de vidrio. El sistema electromecánico fue desarrollado por profesores y estudiantes de diferentes áreas, pertenecientes a la Universidad del Valle, y enmarcados en un proyecto de investigación financiado por COLCIENCIAS. El objetivo principal del proyecto fue la construcción de anillos de fijación externa de utilidad en traumatología.

Los anillos producidos anteriormente eran muy irregulares y no lograban cumplir con las características mecánicas mínimas, por ello se consideraban fijadores externos no confiables y se descartaban. Para solucionar el problema fue necesario identificar las variables críticas del proceso y su incidencia en el producto terminado, también fue indispensable identificar, ajustar y caracterizar los actuadores del sistema eléctrico de la máquina, con el fin de configurar un sistema de control y mando electrónico que permite obtener anillos fibrorreforzados repetibles, y con ello cumplir con las características mecánicas necesarias para funcionar como fijadores externos, al mismo tiempo se logró desarrollar una interfaz que permite al operario definir los parámetros de fabricación de los anillos.

Palabras clave: Automatización, mando, control, material fibrorreforzado, fibra de carbono, bobinado de hilos.

ABSTRACT

This document describes an engineering solution, to allow the controlled operation of a winding machine of carbon fibers, located in the Laboratory of Dynamic Tests and Fiber-Reinforced Materials, belonging to the Mechanical Engineering program of the Universidad del Valle.

The machine is used to construct structural elements, configured as solids of revolution (rings and tubes), using fiber reinforced materials based on carbon or glass fibers. The electromechanical system was developed by professors and students from different areas, belonging to the Universidad del Valle, and framed in a research project funded by COLCIENCIAS. The main objective of the project was the construction of external fixation rings useful in traumatology.

The rings produced previously were very irregular and could not meet the minimum mechanical characteristics, so they were considered unreliable external fixators and were discarded. To solve the problem it was necessary to identify the critical variables of the process and its impact on the finished product, it was also essential to identify, adjust and characterize the actuators of the electrical system of the machine, in order to configure an electronic control and command system that allows to obtain repeatable fiber-reinforced rings, and with this to comply with the mechanical characteristics necessary to function as external fixators, at the same time it was possible to develop an interface that allows the operator to define the manufacturing parameters of the rings.

Keywords: *Automation, command, control, fibro reinforced material, carbon fiber, filament winding.*

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de la baquelita, como el primer plástico sintético en la historia, se ha considerado el desarrollo de los materiales como una de las revoluciones del siglo XX. La utilidad en diversos campos ha hecho que sea necesario el perfeccionamiento de sus características mecánicas, como lo es la rigidez y la resistencia, por lo que el refuerzo con diferentes tipos de fibra surgió como una solución para mejorar dichas características.

El bobinado de filamentos es una técnica de fabricación para la producción de materiales fibrorreforzados, generalmente en forma de estructuras cilíndricas como lo son tanques, tubos y anillos. Es importante automatizar el proceso, porque así es posible controlar los parámetros de fabricación y definir las características mecánicas del elemento construido. Las fibras más comunes, usadas en esta técnica, son las de carbono y vidrio; las aplicaciones que se le puede dar a los elementos realizados abarcan varios y diversos campos de la industria. Uno de ellos, el de mayor interés en el contexto de este trabajo de grado, es la fabricación de dispositivos médicos, donde el uso de anillos reforzados con fibra de carbono, como parte de un sistema de fijación externa, utilizados como soportes estructurales en la consolidación de fracturas óseas, permite tener ciertas ventajas respecto a los fijadores tradicionales, como son: menor peso del sistema de fijación, dando mucha comodidad al paciente durante su rehabilitación, y la permeabilidad a los rayos X, evitando el desmonte del dispositivo durante los exámenes médicos de supervisión.

Actualmente, es escaso el desarrollo de materiales fibrorreforzados en el país, se conocen casos de unas cuantas empresas ubicadas en Medellín y Bogotá, las cuales usan maquinas bobinadoras para la construcción de tubos, tanques y postes fibrorreforzados, sin embargo, no se tiene conocimiento de empresas nacionales que usen esta tecnología para la fabricar dispositivos médicos.

A nivel académico, el Grupo de Investigación de Mejoramiento Industrial (*GIMI*), de la Universidad del Valle, diseñó e implementó una máquina para la construcción de anillos fibrorreforzados, con el fin de estudiar la influencia de los parámetros de fabricación en las propiedades del producto terminado, específicamente al ser utilizados como parte de sistemas de fijación externa usado en traumatología, sin embargo, no se lograron controlar las variables críticas del proceso, limitando las propiedades de los anillos. Es por esto que surge la necesidad de asegurar el control de las variables que inciden en el producto final y poder especificar las condiciones a cumplir para obtener resultados confiables y repetibles, además de aportar al desarrollo de tecnologías involucradas con el manejo de materiales fibrorreforzados, e impulsar la construcción de este tipo de máquinas en el país.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Bobinado de Filamentos

El bobinado de filamentos es un proceso en el cual se enrollan fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un mandril giratorio, que tiene la forma interna del artículo reforzado con fibras que se requiere producir. La resina se cura (seca) después y el mandril se retira. Se producen componentes huecos de simetría axial (usualmente circulares), así como formas irregulares. La forma más común del proceso se describe en la *Figura 1.1*. Una banda de mecha de fibras se pasa a través de un baño de resina inmediatamente antes de ser enredada de forma helicoidal sobre un mandril cilíndrico. Continuando el patrón de bobinado se completa finalmente una capa superficial sobre el mandril de un filamento grueso. La operación se repite para formar capas adicionales, cada una de éstas tiene un patrón entrecruzado con respecto a la anterior, hasta obtener el espesor adecuado [1]. Su mejor uso es para la fabricación de tubos en forma de objetos, tales como tanques de almacenamiento de alta presión; para aplicaciones comerciales como ejes de palos de golf y cañas de pescar, y para aplicaciones médicas en la construcción de fijadores externos con materiales fibrorreforzados. Existe una gran variedad de fibras y resina, estas van en función del coste y el rendimiento necesario. En general, la fibra de vidrio es la más barata, pero tiene el nivel de rendimiento más bajo; la fibra de carbono es la más cara, y tiene el nivel de rendimiento más alto [2].

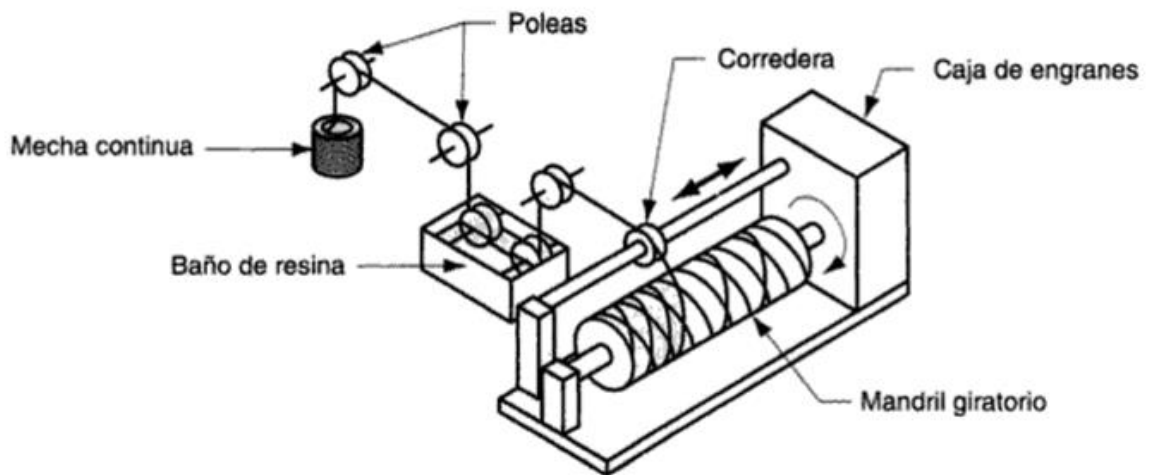


Figura 1.1. Bobinado de filamentos [1]

Hay tres métodos para impregnar las fibras con resina.

1. **Bobinado húmedo:** el filamento pasa a través de la resina líquida en el portaherramientas del torno momentos antes de llegar al mandril.
2. **Bobinado prepreg o seco:** el filamento está pre-impregnado con resina parcialmente curada.
3. **Post-impregnado:** una vez finalizado el bobinado, se realiza un impregnado de las fibras sobre el mandril, éste está fijo y es el porta-herramientas el que va recorriendo al mandril longitudinalmente. Cada paso va superponiendo las fibras entre sí, formando los patrones característicos de este proceso [3].

1.2. Patrones de bobinado de filamentos

En el proceso del bobinado de filamentos, la tensión de bobinado, ángulo de enrollamiento y contenido de resina en cada capa de refuerzo pueden ser variados hasta que se alcance el espesor deseado y la fuerza del material compuesto. Las propiedades del material compuesto acabado se logran variando el tipo de patrón de bobinado. En general, hay tres patrones de bobinado de filamentos básicos los cuales son:

Bobinado en aro: también se le conoce como el bobinado circunferencial. En el bobinado en aro, se realiza un enrollamiento helicoidal con un ángulo de bobinado próximo a 90 grados. Por cada rotación completa del mandril se avanza el ancho de la banda de filamentos que se está enrollando, como se muestra en la Figura 1.2.

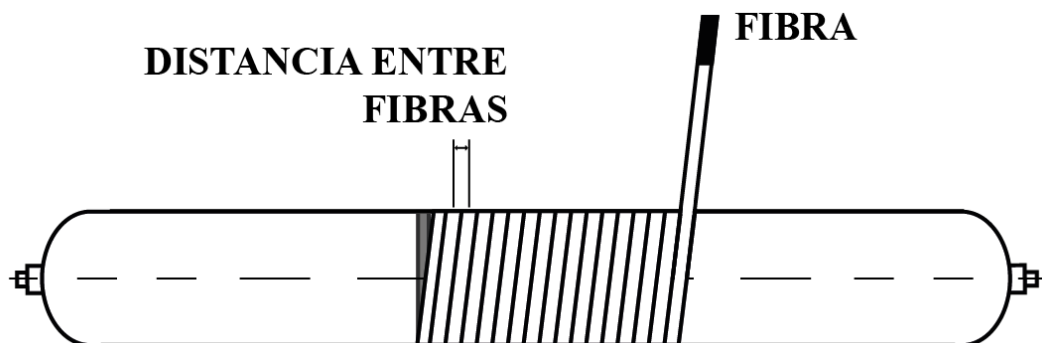


Figura 1.2. Bobinado en aro [4]

Bobinado helicoidal: en el bobinado helicoidal, el mandril gira a una velocidad constante mientras que el carro de alimentación de fibra se mueve transversalmente hacia adelante y hacia atrás a una velocidad regulada para generar los ángulos helicoidales deseados como se muestra en la Figura 1.3.

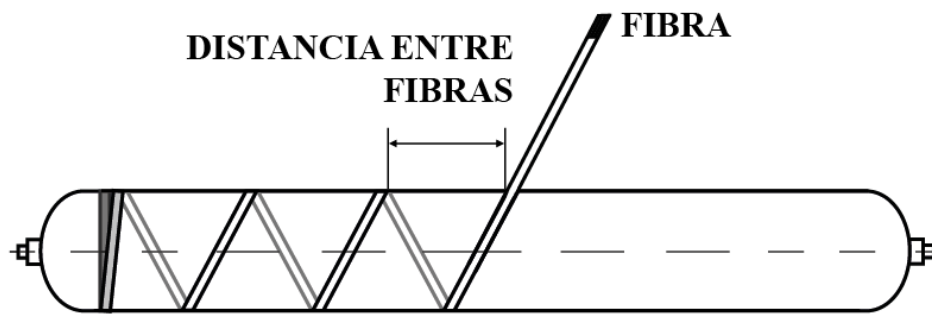


Figura 1.3. Bobinado Helicoidal [4]

Bobinado polar: en el bobinado polar, la fibra pasa tangencialmente a la abertura en un extremo del molde, invierte la dirección y pasa tangencialmente al lado opuesto de la abertura en el otro extremo. En otras palabras, las fibras se envuelven de polo a polo a medida que el brazo del mandril gira alrededor del eje longitudinal como se muestra en la Figura 1.4. Este método se utiliza para enrollar fibras en recipientes de presión. En los recipientes cilíndricos con caras paralelas, se realiza un bobinado subsiguiente para las tapas [4].

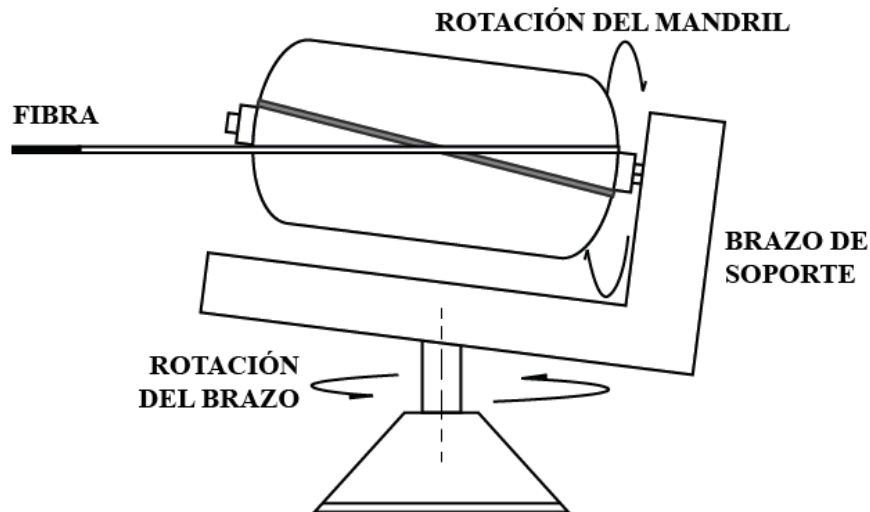


Figura 1.4. Bobinado polar [4]

1.3. Fibra de carbono

La fibra de carbono es una cadena larga y delgada de material de aproximadamente 0,0002-0,0004 pulgadas (0,005-0,010 mm) de diámetro y compuesta principalmente por átomos de carbono. Los átomos de carbono se unen entre sí en cristales microscópicos que están más o menos alineados paralelamente al eje largo de la fibra. La alineación de cristal hace que la fibra increíblemente fuerte en relación a su tamaño. Varios miles de fibras de carbono se retuercen entre sí para formar un

hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o puesto en un tejido. El hilo o tejido se combina con resina, y se enrolla o moldea para formar diversos materiales compuestos [5].

Clasificación

Según sus propiedades la fibra de carbono se divide en los siguientes tipos:

- Ultra- alto módulo, tipo UHM (módulo $> 450\text{Gpa}$).
- De alto módulo, tipo HM (módulo de entre $350 - 450\text{Gpa}$).
- Intermedio – módulo, tipo IM (módulo de entre $200 - 350\text{Gpa}$).
- Módulo bajo y de alta resistencia a la tracción, tipo HT (módulo $< 100\text{Gpa}$, resistencia a la tracción $> 3.0\text{Gpa}$).
- Súper alta resistencia, tipo SHT (resistencia a la tracción $> 4.5\text{Gpa}$).

Según los materiales del precursor, las fibras de carbono se pueden clasificar en:

- Fibras de carbono basadas en PAN
- Fibras de carbono a base de brea
- Fibras de carbono basadas en brea de meso-fase (con una estructura similar a la del grafito)
- Fibras de carbono a base de brea isotrópica
- Fibras de carbono a base de Rayón
- Fibras de carbono cultivadas – en fase gaseosa

En la Figura 1.5 se observa una comparación de las fibras comerciales según las características mencionadas anteriormente, donde se destaca que las fibras basadas en brea tienen un módulo de tracción alto, pero una resistencia a la tracción baja, mientras las fibras basadas en PAN tienen un módulo de tracción bajo, y una resistencia a la tracción alta.

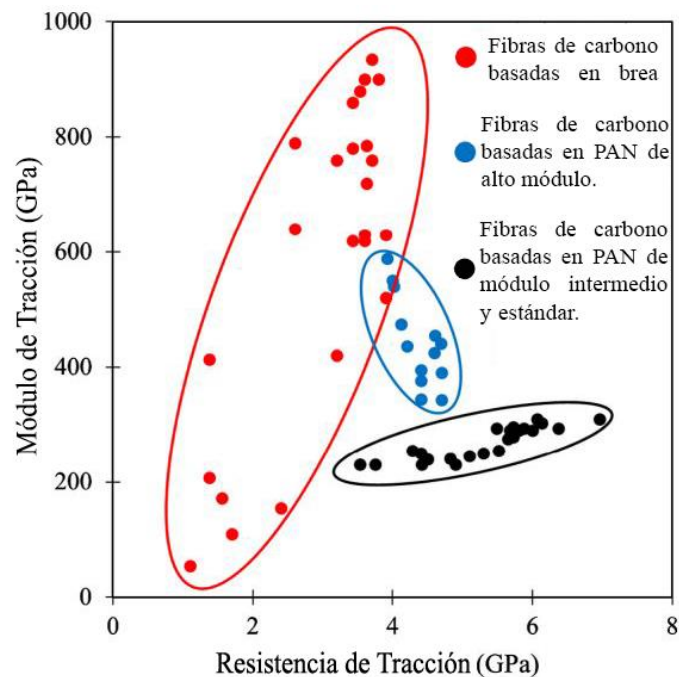


Figura 1.5. Mód. vs res. de tracción para fibras PAN y brea comerciales [6].

Según la temperatura de tratamiento térmico final se pueden clasificar en:

- Tipo I. Tratamiento de alta temperatura (HTT), donde la temperatura del tratamiento térmico final debe estar por encima de 2000 °C y puede ser asociado con el tipo de fibra de alto módulo.
- Tipo II. Tratamiento de calor intermedio (IHT), donde la temperatura del tratamiento térmico final debe estar alrededor o por encima de 1500 °C y puede ser asociado con el tipo de alta resistencia de la fibra.
- Tipo III. Tratamiento a baja temperatura, donde las temperaturas finales de tratamiento térmico no son superiores a 1000 °C. Estos son de bajo módulo y materiales de baja resistencia.

Según el tejido:

La fibra de carbono se mide por la anchura del tejido, es decir, un tejido de 1K se aproxima a 1mm de ancho, 6K a 6mm, 12K a 12mm, etc. La definición K, está relacionada por cada 1.000 fibras de carbono que componen cada hilo del tejido. Los más comunes son 1K, 3K, 6K, 12K, 24K, 50K. Estas fibras se tejen en la tela con diversos patrones de tejido, siendo la 3K la más común. Estos números describen el tamaño del paquete utilizado y tienen poca incidencia en relación a la calidad de la fibra [7].

1.4. Resina

La resina es la encargada de formar la matriz polimérica donde quedan atrapadas las fibras, estas pueden ser naturales o sintéticas. Las resinas más utilizadas como matriz polimérica son sintéticas, entre las más comunes se encuentran resinas de poliéster, viniléster, epoxi y fenol-formaldehído (fenólica). Las resinas sintéticas pertenecen a los polímeros termoestables, se presentan como un líquido viscoso, que debe reaccionar con otro líquido para iniciar la reacción en cadena que pasará en un estado irreversible de gel terminando en el curado, formando una estructura rígida y liviana. Además por tener buena resistencia al impacto, a los solventes, gases y temperaturas extremas. Los parámetros que hacen diferenciar cada tipo de resina sintética son los componentes que son necesarios para iniciar la polimerización. Estas diferencias generan variaciones en la dureza, el tiempo de uso/trabajo, condiciones requeridas para el proceso de curado y post-curado [3].

Resina de poliéster insaturado: estas son las más utilizadas en la fabricación de compuestos de uso general, son fáciles de procesar ya que se pueden reticular incluso a temperatura ambiente, poseen buena resistencia química y son de bajo costo. Como desventaja su contracción en el curado es elevada, la reacción de curado es altamente exotérmica lo que puede generar daños en el material [8].

Resinas viniléster: se caracterizan por su buena resistencia química y a la corrosión, además de Presentan una buena capacidad de adhesión, sin embargo su precio es mucho más elevado que el de las resinas de poliéster [8].

Resinas fenólicas: dentro de su proceso de fabricación se genera agua como producto residual, esta debe eliminarse ya que puede dar lugar a defectos en la pieza final por formación de grietas o poros, además sus propiedades mecánicas son bajas [8].

Resinas epoxi: características por su humectación y adherencia óptima, buen aislamiento eléctrico, alta resistencia mecánica y térmica además de tener un grado de contracción bajo durante el proceso de curado. Su desventaja es su alto costo y que su proceso de curado es lento [8][9].

2. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA

El propósito de la máquina es fabricar piezas en fibra de carbono configuradas como sólidos de revolución, como son: anillos, tubos o recipientes a presión, basándose en el proceso de enrollamiento de cintas o hilos, descrito por Shao y Lin [10], también conocido como '*filament winding*'. El desarrollo de la máquina estuvo enmarcado dentro del proyecto global "Desarrollo de anillos de fibra de carbono para sistemas de fijación externa" financiado por COLCIENCIAS [11].

La máquina consta de cuatro sistemas principales:

2.1. Sistema de rotación del molde

El sistema de rotación del molde mostrado en la Figura 2.1, funciona similar al sistema de rotación de una pieza en un torno horizontal: consta de una mordaza y una contrapunta entre las cuales se sujeta el molde. La mordaza se acciona por un motorreductor a través de un sistema de correa y poleas dentadas. La contrapunta está soportada en un cabezal móvil que se puede deslizar sobre dos barras paralelas según la longitud del molde. El cabezal tiene bujes de bronce que se deslizan sobre las barras para disminuir la fricción [12].

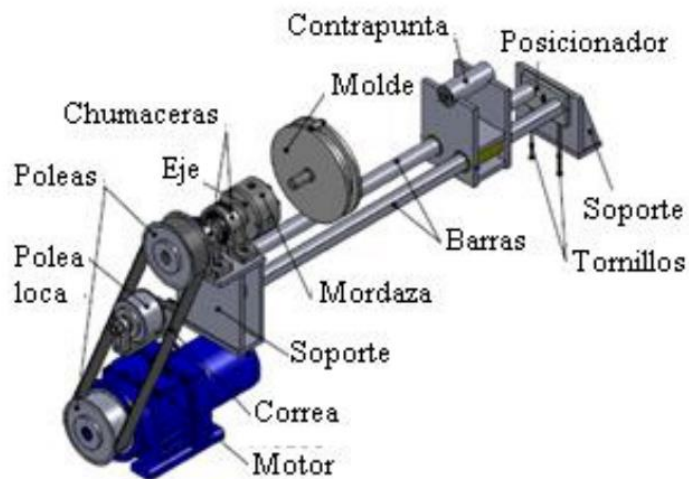


Figura 2.1. Sistema de rotación de molde [12]

2.1.1. Molde del anillo

La máquina cuenta con un molde metálico modular que se compone de dos tapas, una lámina rectangular, y un eje que es sostenido por la mordaza del sistema de rotación. Cada tapa tiene tres ranuras circulares (dos en la cara frontal y una en la trasera, ver Figura 2.2 y Figura 2.3) que permiten acomodar láminas con longitud equivalente al perímetro de las ranuras para la construcción de anillos con diferentes características físicas.

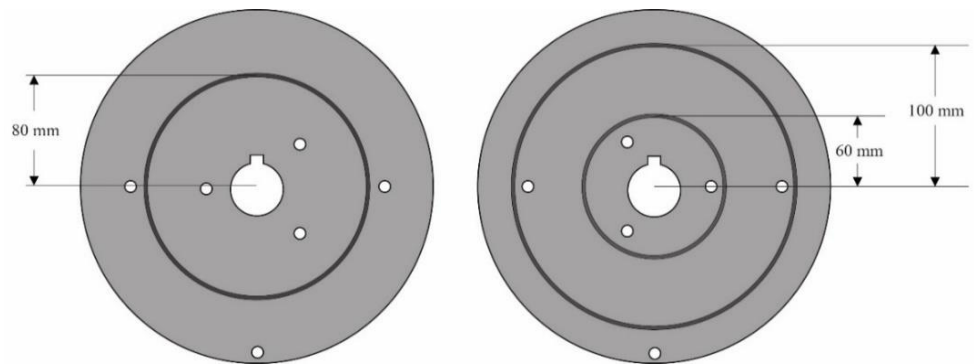


Figura 2.2. Cara frontal y trasera de la primera tapa del molde.

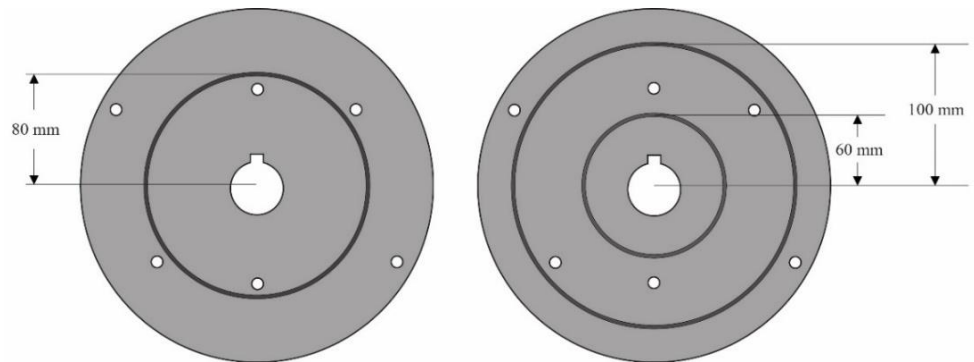


Figura 2.3. Cara frontal y trasera de la segunda tapa del molde.

Las dos tapas de los moldes tienen un orificio central por el cual pasa un eje ranurado y roscado en la punta. El eje lo soporta la mordaza del sistema de rotación (ver Figura 2.1) y su función es sostener y hacer girar las dos tapas del molde que aprietan la lámina entre ellas.

La longitud de las láminas coincide con el perímetro de las ranuras circulares de las tapas, por lo que al poner una lámina en su respectiva ranura se juntarán ambos extremos de esta, dicha unión se aprovecha para poner la punta de la fibra de carbono quedando así sujeta al molde. Para que las tapas giren en el sentido deseado y no se deslicen al tensionar la fibra se pone una cuña en la ranura del eje y se aprieta la tuerca, los elementos del molde y la descripción anterior se visualizan en la Figura 2.4.

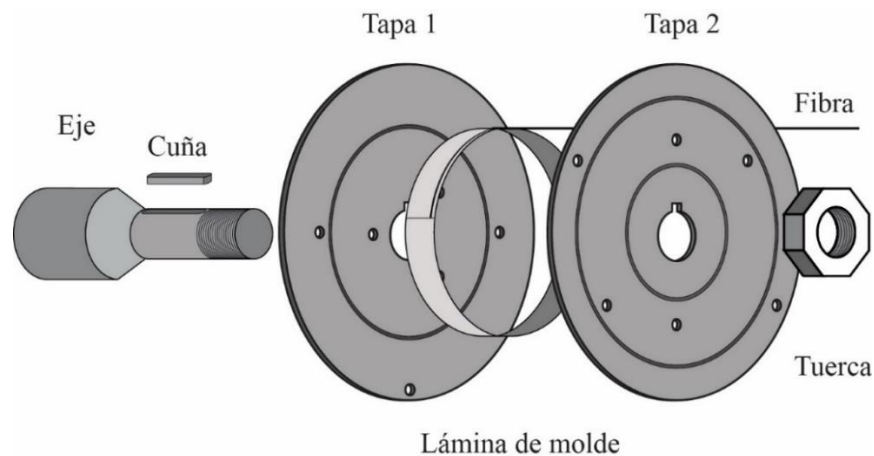


Figura 2.4. Elementos del molde.

2.2. Sistema de alimentación de fibra y tensión

El sistema de alimentación de fibra mostrado en la Figura 2.5 consta de un carro móvil que guía la fibra por un sistema de poleas hacia una cubeta para que se impregne de resina y posteriormente vaya hacia el molde y se distribuya sobre él. El carro se desplaza sobre barras paralelas impulsado por un tornillo de bolas SKF SD/BD para poder cubrir toda la longitud del molde. La velocidad de este carro se utiliza para controlar el ángulo de enrollamiento [12], adicionalmente sobre el carro móvil se cuenta con un sistema de tensión el cual se compone de un motor, poleas dentadas, correa y rodillos cuya finalidad es mantener una tensión constante a lo largo de la trayectoria de la fibra hasta el molde, frenando el desplazamiento de los hilos mediante los rodillos por donde ésta pasa, sin embargo, el sistema de tensión nunca logró ponerse en operación.

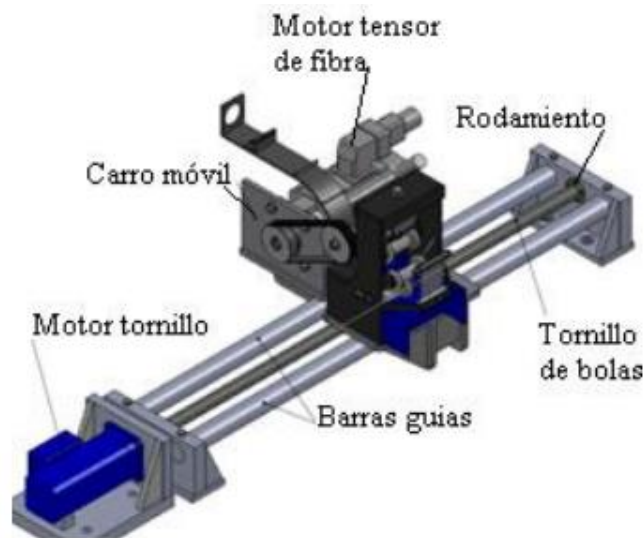


Figura 2.5. Sistema de alimentación de fibra [12]

2.3. Sistema de soporte

La estructura de soporte de la máquina mostrada en la Figura 2.6 consta de una mesa que es una platina cuadrada donde por medio de tornillos se a los sistemas de rotación y alimentación de fibra, ésta a su vez se une por tornillos a un sistema denominado soporte de la mesa, que se une a las patas por medio de tornillos laterales [11].

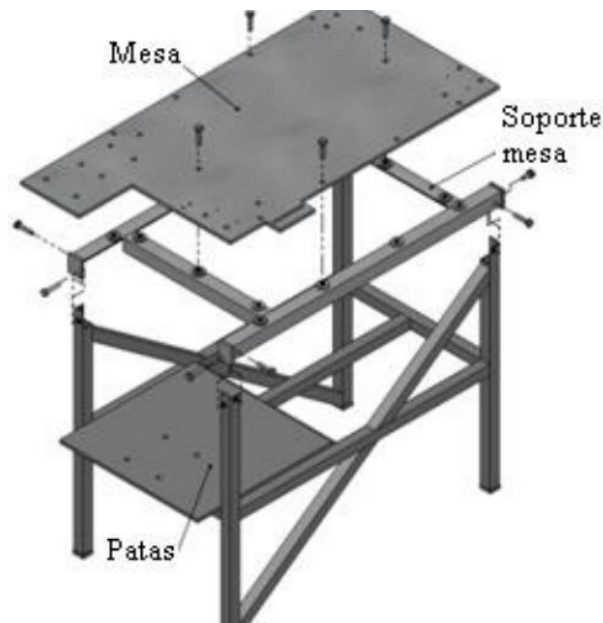


Figura 2.6. Sistema de soporte de la máquina [12].

2.4. Sistema eléctrico y de control

El sistema eléctrico y de control permite manipular, de manera automática, los motores para rotación del molde y para la alimentación de la fibra.

Los elementos que componen ambos sistemas son:

2.4.1. Motores

2.4.1.1. Motor de freno:

Inicialmente, se diseñó un sistema de frenado para soportar una tensión de 1000 N con 10 hilos, que garantizara una tensión de 100 N por hilo; para ello se requería un motor con un torque mínimo de 10 Nm, velocidad de 318,6 RPM y potencia de 0,45 HP. La manera como se encontraron dichos valores se puede consultar en [11]. Sin embargo, las opciones comerciales de motores con las características requeridas resultaron ser muy pesados, por lo tanto las barras guías del carro móvil y el tornillo de bolas no iban a soportar la deflexión causada, además, eran muy grandes para ubicarlos en el carro móvil, así que los diseñadores decidieron trabajar con 5 hilos

simultáneos como máximo, para lo cual los requerimientos disminuyeron así: potencia máxima a 0,22 HP, velocidad angular máxima a 318,6 RPM y torque a 5 Nm [11]. Entonces, escogieron un motor de la marca SEW EURODRIVE, cuyas características se presentan en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Características del motor de frenado de las fibras.

Referencia SE	Torque (Nm)	Velocidad	Voltaje (VAC)	Peso (Kg)
CFM71S	5 nominal	3000 RPM	220 AC	9,5

2.4.1.2. Motor del Tonillo

Para la elección del motor de tornillo se consideró una masa del carro móvil de 60 Kg, una distancia de frenado de 5% de la longitud de la pieza (4 cm), un tornillo de bolas de paso de 10 mm y un coeficiente de fricción entre el carro y las barras de desplazamiento de 0,1.

El torque máximo que se debía proveer es de 1,8 Nm, la velocidad angular máxima de 800 RPM y la potencia del motor de 151 W. La manera en que se hallaron dichos valores se pueden encontrar en [11]. El motor seleccionado fue de la marca SEW EURODRIVE (características en la Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Características del motor del tornillo.

Referencia SE	Torque (Nm)	Velocidad	Voltaje (VAC)	Peso (Kg)
DFS56L	2 nominal	3000 RPM	220 AC	3.5

2.4.1.3. Motor del sistema de rotación

Para la selección del motor de molde se tuvo en cuenta la velocidad lineal de bobinado utilizada por las máquinas comerciales para este tipo de proceso, la cual es de 22 m/min, por lo que se seleccionó un motor SEW EURODRIVE (características en la Tabla 2.3) [11]:

Tabla 2.3. Características del motor del sistema de rotación.

Referencia SE	Torque (Nm)	Velocidad	Potencia (kW)	Peso (Kg)
R47DT90L4	183 nominal	78 RPM	1.5	30

2.4.2. Variadores, sensores y actuadores

2.4.2.1. Variadores de frecuencia Movidrive B MDX61B0022 y MDX61B0015:

La máquina cuenta con dos variadores vectoriales de frecuencia, como el que se muestra en la Figura 2.7, los cuales controlan accionamientos AC síncronos o asíncronos, de alimentación trifásica a 200 – 220 VAC, potencia nominal de 2,2 kW con corriente de salida de 8,6 – 10,8 A para la referencia MDX61B0022 y 1,5 kW con corriente de salida de 7,3 – 9,1 A para la referencia MDX61B0015 [13].



Figura 2.7. Variador de frecuencia MDX61B tamaño 1 [13].

La conexión al bus de campo se puede realizar mediante cualquiera de los siguientes protocolos:

- PROFINET IO / Modbus TCP + EtherNet/IP
- Bus del Sistema (SBUS)
- EtherCAT
- PROFIBUS DPV1
- CANopen / DeviceNet
- INTERBUS / INTERBUS – FOC
- PROFIsafe via PROFIBUS / PROFIsafe via PROFINET

De los cuales se configuró la comunicación entre variadores con el protocolo SBUS.

La conexión al computador se realiza mediante un adaptador de interface vía USB desde el variador que haya sido configurado como variador maestro.

2.4.2.2. Variador de frecuencia MOVITRAC LTE-B:

La máquina cuenta con un variador de frecuencia como el que se observa en la Figura 2.8. Su tensión de entrada de 200 – 240 VAC, potencia nominal de 1,5 kW, con corriente de salida de 7 A. El protocolo de comunicación que maneja para la conexión al bus de campo es SBUS [14].



Figura 2.8. Variador de frecuencia LTE-B [14].

2.4.2.3. Herramienta de software MOVITOOLS Studio:

Paquete de software que ofrece la continuidad en la ejecución de las siguientes funciones [13]:

- Parametrización de los variadores vectoriales
- Puesta en marcha
- Visualización y diagnóstico
- Programación

Para ejecutar las funciones anteriores con los variadores están integrados en el paquete de software los siguientes componentes básicos:

- MotionStudio
- MOVITOOLS

Dentro de los cuales se encuentra para la programación de los variadores las herramientas PLC editor y IPOS Plus assembler and compiler.

Mediante la herramienta SEW communication server se realiza la comunicación con los variadores vectoriales MDX61B0022/15, los protocolos que soporta son [13]:

- Serie (RS – 485) a través del adaptador de interfaces
- Bus de sistema (SBUS) a través del adaptador de interfaces
- Ethernet
- EtherCAT
- Bus de Campo (PROFIBUS DP/DP - V1)
- Tool Calling Interface

2.4.2.4. RTD 805:

Sensor RTD de temperatura de aire marca Omega. Se compone de película delgada de platino la cual se expone al flujo de aire mientras está protegida contra el paso de residuos por una carcasa ventilada de acero. Esta construcción utiliza un alambre de níquel chapado AWG # 26. Este diseño viene con un conector estándar MTP extraíble en miniatura de tres clavijas. La película delgada de platino tiene una resistencia de $100,00 \pm 0,12 \Omega$ a 0°C y un coeficiente de temperatura (α) de $0,00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$, el rango de temperatura del RTD 805 es de -50°C a 230°C [15] y se puede observar junto al alambre de níquel aislado y el conector estándar MTP en la Figura 2.9

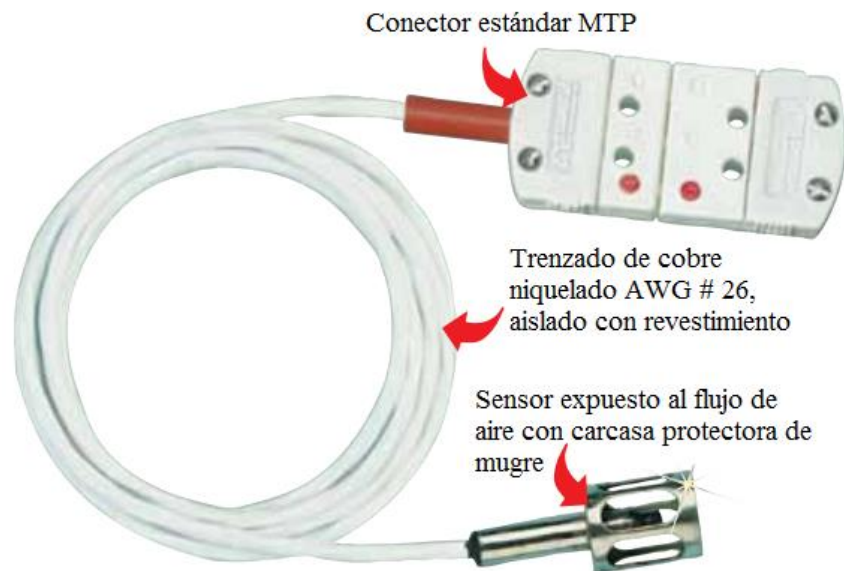


Figura 2.9. RTD 805 [15].

2.4.2.5. Pistola de calor HG 2310 LCD:

Pistola de aire caliente marca STEINEL con rango de temperatura de 50 – 650 °C, cuenta con un regulador de temperatura y caudal de aire [16] (ver Figura 2.10).



Figura 2.10. Pistola de calor STEINEL [16].

2.4.2.6. Transmisor de temperatura EBC HQ REF. 69000:

Transmisor de temperatura de tres hilos para sensores RTD, exactitud de 0,15%, impedancia de entrada de 10 MΩ o más, tiempo de respuesta menor a 300 ms, ajuste de cero hasta el 10% de F.S. y de span hasta el 20% de F.S [17].



Figura 2.11. Transmisor de temperatura [17].

2.4.2.7. Celda de carga TML TCLZ 2KNA:

La máquina cuenta con una celda de carga TML TCLZ 2KNA la cual soporta una tensión de hasta 2 KN y cuya sensibilidad es de 2 mV/V [18], se escogió esta celda de carga para sobredimensionar la carga máxima la cual es sometida sobre el rodillo que ejerce la tensión de las fibras, ésta se encuentra ubicada en el carro móvil. La celda de carga se puede observar en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Celda de carga TML TCLZ 2KNA [18].

2.4.2.8. Acondicionador de señal DRF – LC 230VAC 20MV:

Acondicionador de señales que recibe como entrada una celda de carga y proporciona una salida aislada de 0 - 10 VDC o de 4 - 20 mA. El modelo con el que cuenta la máquina se alimenta a 230 VAC y tiene un rango e entrada de 0 – 20 mV, el acondicionador se puede observar en la Figura 2.13 [19].



Figura 2.13. Acondicionador de señal DRF-LC 230VAC 20MV [19].

2.4.3. Estado inicial de la máquina

La máquina contaba inicialmente con los elementos mostrados en la Tabla 2.4. Los dispositivos del sistema eléctrico y de control clasifican dentro de los otros sistemas funcionales, con el fin de mostrar cómo estaba configurada la máquina y como operaba antes de la ejecución de este trabajo de grado.

Los variadores de frecuencia, usados en el sistema de rotación de molde y alimentación de fibra, eran manejados por un programa principal, el cual permitía hacer anillos con un determinado número de capas, sin embargo, no se encontró documentación de cómo se estimaban los valores de la velocidad de los motores.

El variador de frecuencia y el motor usados en el sistema de tensión estaban inactivos, por lo que el motor de freno gira libremente sin generar tensión sobre la fibra. Los elementos para el registro de temperatura estaban inactivos, y no se contaba con el transmisor de temperatura EBC HQ REF. 69000.

No existía interfaz de usuario para el manejo del programa principal que controlaba el sistema.

Tabla 2.4. Elementos iniciales de la máquina bobinadora de hilos.

SISTEMA	ELEMENTO	ESTADO
Sistema de soporte	Mesa	En uso
	Molde del anillo	En uso
Sistema de rotación del molde	Variador de frec. MOVITRAC LTE-B	En uso
	Motor R47DT90L4	En uso
Sistema de alimentación de fibra	Variador de frec. MDX61B0015	En uso
	Motor DFS56L	En uso
Sistema de tensión	Variador de frec. MDX61B0022	Inactivo
	Motor CFM71S	Inactivo
	Celda de carga TML TCLZ 2KNA	Inactivo
	Acondicionador de señal DRF – LC 230VAC 20MV	Inactivo
Elementos adicionales	Pistola de calor HG 2310 LCD	Inactivo
	RTD 805	Inactivo

2.4.4. Esquema de conexión de los elementos de Control y Potencia

El sistema eléctrico y de control manejan un bus de campo, este esta soportado en el protocolo SBUS (RS-485), necesario para intercambiar información del proceso, entre el variador MDX61B0015 configurado como dispositivo maestro y los variadores MDX61B022 y MOVITRAC LTE-B configurados como dispositivos esclavos. La parametrización de estos se realiza antes de la puesta en marcha, mediante la conexión punto a punto, entre el computador, que contiene la herramienta de software MOVITOOLS, y cada uno de los variadores de frecuencia, procedimiento que se explicará posteriormente. Luego de realizar la parametrización de los variadores y la descarga del programa principal en el dispositivo maestro, la función del computador cambia para convertirse en la interfaz gráfica de usuario, permitiendo al operario establecer las características mecánicas del producto final y visualizar el estado de las variables del producto en construcción. En la Figura 2.14 se puede ver la conexión de los elementos de control y potencia.

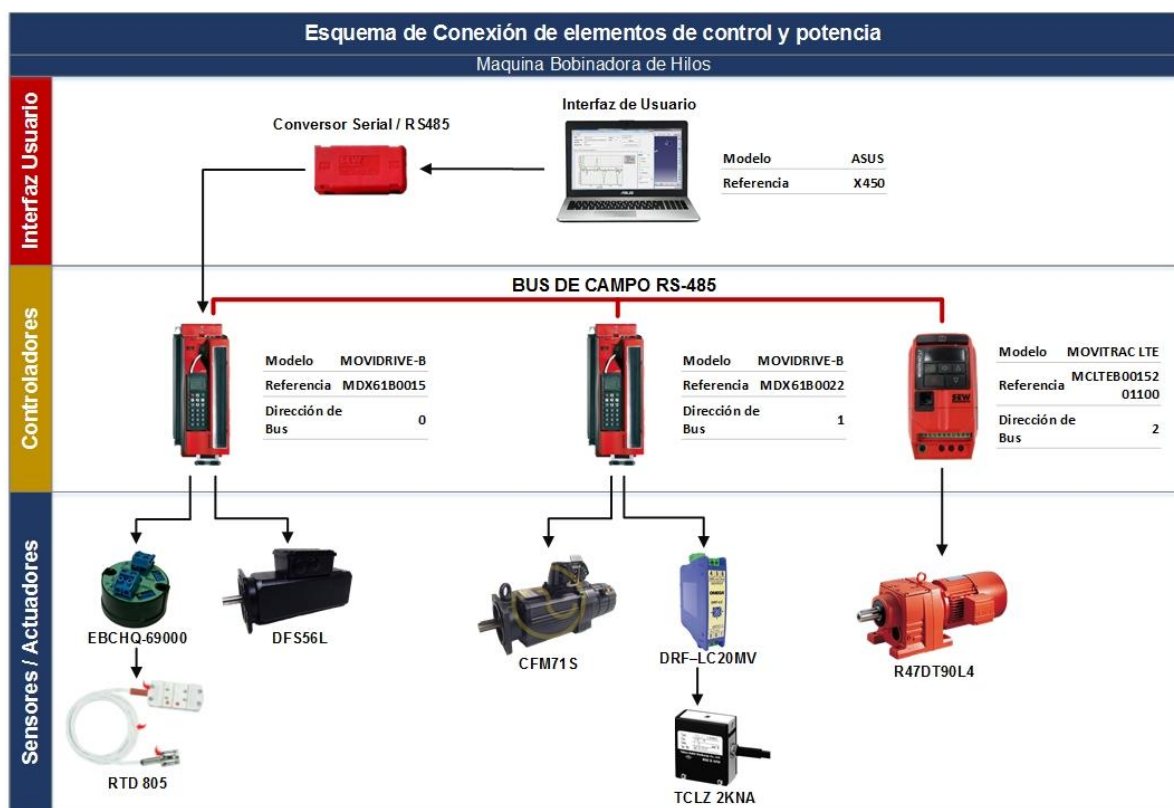


Figura 2.14. Conexión de equipos de control y potencia.

2.5. Proceso e incidencia de parámetros de fabricación

2.5.1. Proceso de fabricación de anillos fibrorreforzados

El proceso de fabricación se puede dividir en tres grandes etapas: durante la primera etapa la fibra se impregna de resina y se arrolla sobre el molde giratorio; la segunda es la etapa de curado, en la cual el anillo gira mientras seca la resina; en la tercera etapa se reduce el radio externo y se pulen los bordes externos e internos del anillo.

La máquina bobinadora de hilos se ocupa de las primeras dos etapas del proceso de fabricación, en ellas se varían cuatro parámetros fundamentales de fabricación que son: tensión de la fibra, ángulo de bobinado, temperatura de bobinado/curado y número de capas del anillo. En la Figura 2.15 se muestra un diagrama de flujo de las actividades que se deben realizar en las primeras dos etapas para construcción de un anillo fibrorreforzado.

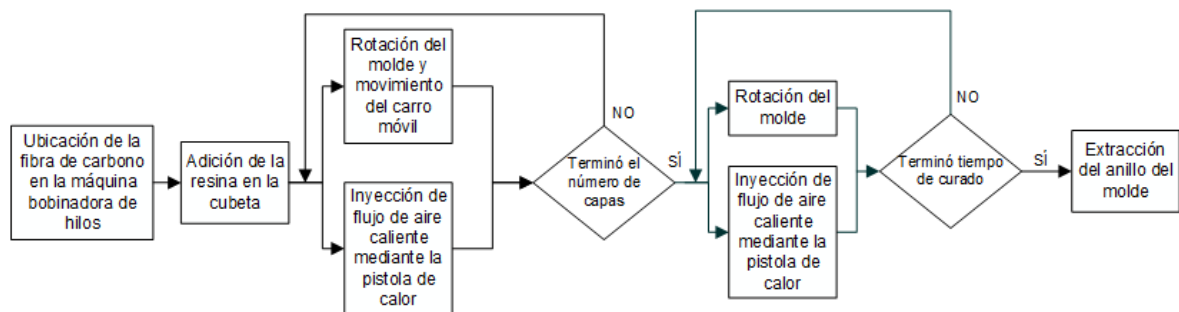


Figura 2.15. Diagrama de flujo para el proceso de bobinado y curado.

La tercera etapa se desarrolla sobre un torno mecánico, Magnum Cut FI-1440GJZ, del laboratorio de maquinado de la Universidad del Valle, en dicha máquina se reduce el radio externo del anillo hasta la medida deseada y se pulen los bordes del anillo utilizando una lija. En el capítulo 6 se detalla el procedimiento y se muestra su ejecución para una mayor comprensión.

2.5.2. Incidencia de parámetros de fabricación

2.5.2.1. Tensión

La tensión de bobinado en las fibras, se relaciona directamente con la fracción de volumen de fibra de los anillos fibrorreforzados, a mayor tensión se obtiene una mejor compactación de la fibra, esto incide en mayor rigidez del elemento y en aumento de la resistencia a ruptura. En [20] se hizo una investigación experimental, para determinar el volumen de fibra en tubos fibrorreforzados con diferente tensión. Es así como, para una tensión de bobinado de 26,7 N el volumen de fibra promedio es de 70,8%, con una desviación de los datos del 0,05%, mientras que para una

tensión de bobinado de 44,5 N el volumen de fibra promedio es de 74,0%, con una desviación del 0,38%, esto representa un aumento significativo en la fracción de volumen de fibra para un aumento de tensión.

En [21], se realizó un estudio de los anillos fibrorreforzados, fabricados por la máquina bobinadora de hilos de este trabajo de grado, sin usar el sistema de tensión. Se dejaron girar libremente las poleas por donde pasa la fibra y se registró en ese caso una tensión promedio de 5 N, luego se le impidió el giro a la polea ubicada dentro del recipiente de contenedor de resina, y se registró una tensión promedio de 20 N, se realizaron anillos para ambos casos y se encontró que la rigidez de los anillos fabricados a tensión alta (20 N) aumenta alrededor de un 40% respecto a la rigidez de los anillos fabricados a baja tensión (5 N).

Para la fabricación de anillos de fibra de carbono, en la máquina bobinadora, una vez instalado el sistema de tensión, se debe tener en cuenta el límite de tensión por hilo, el cual es de 100 N, que es un parámetro de diseño del sistema [11].

2.5.2.2. Angulo de bobinado

El sentido de las fibras influye en el resultado de las pruebas mecánicas que se realicen en el anillo fibrorreforzado. En [22], se realizó un estudio del proceso de extracción del mandril al terminar el elemento fibrorreforzado y se menciona la influencia del ángulo de bobinado en la técnica de bobinado de filamentos, un elemento cilíndrico fibrorreforzado de ángulo alto (cerca de 90°), proporcionó resistencia radial; mientras que los patrones de ángulo inferior (polar o helicoidal), proporcionaron mayor resistencia a la tracción longitudinal / axial.

Los productos con patrones de bobinado helicoidal, cuya necesidad es de una alta resistencia longitudinal, son: tuberías, palos de golf, remos, horquillas para bicicletas, tanques de presión y tuberías; mientras que elementos, como anillos fibrorreforzados, que funcionan como parte de un sistema de fijación externa requieren de una alta resistencia radial.

Para la máquina bobinadora usada en este trabajo de grado, el molde del anillo hace que éstos tengan un grosor de 9,7 mm y no permita patrones de bobinado helicoidales, por el contrario, restringe el patrón de bobinado a tipo aro. Idealmente, se debería limitar el proceso para ángulos de 89 grados, con el fin de obtener mayor resistencia radial para los anillos, sin embargo, se estableció un rango que permitiera variar mínimamente el ángulo de bobinado, con el fin de estudiar su incidencia en las propiedades del producto final en un trabajo futuro, el rango establecido fue entre 87 y 89 grados.

2.5.2.3. Temperatura

La resina epoxi con la que se cuenta, se caracteriza por su alta resistencia mecánica; sin embargo, el proceso de curado es lento. En [21], se trabajó sobre la misma máquina usada en este trabajo de grado, en donde se realizaron anillos fibrorreforzados a temperatura ambiente y a una temperatura de 65 °C, obteniendo una aumento cercano al 8% en la rigidez de los anillos a temperatura de 65 °C, respecto a los fabricados a temperatura ambiente.

Los anillos producidos se realizaron a una temperatura de 65 °C, con el fin de compararlos con los fabricados en [21].

2.5.2.4. Número de capas

Una capa, se considera como el desplazamiento horizontal del carro móvil en cualquier sentido (derecha/izquierda). El número de capas se relaciona directamente con el grosor del anillo, a mayor número de capas se obtiene un anillo con un diámetro externo mucho más grande, sin embargo, hay que tener en cuenta que el diámetro externo se determina mediante el maquinado del anillo.

Para los anillos cuyo objetivo fue compararlos con los anillos fabricados en [21], el número de capas necesario para su construcción fue de 120, establecido mediante el siguiente procedimiento:

- Establecer el radio externo del anillo.
- Marcar con un lápiz en la cara interna del molde el radio externo del anillo.
- Establecer desde la interfaz de usuario 600 capas.
- Cuando el radio externo del anillo cubra el radio marcado en el molde, dejar bobinar durante 20 capas más y finalmente parar la etapa de bobinado.

El procedimiento deberá aplicarse cada vez que se quiera establecer un anillo de diferente diámetro, por lo tanto, el número de capas del anillo no se limitó a un rango.

A continuación se presentan en la Tabla 2.5 los rangos en los parámetros de fabricación de los anillos.

Tabla 2.5. Rangos de parámetros de fabricación establecidos.

Tensión	0 – 100 N
Ángulo de bobinado	87 – 89 °
Temperatura	50 – 650 °C
No. de Capas	1 - 9999

3. CONTROL DEL CARRO MOVIL Y EL MANDRIL

La velocidad y distancia recorridas por el carro móvil y el mandril, en la máquina bobinadora, definen características físicas importantes, como son: el patrón de bobinado, la anchura y el grosor del anillo fibrorreforzado. En términos de control, el objetivo principal es controlar la velocidad del mandril y del carro móvil, acorde a la relación mostrada en la **ecuación (1)**.

$$N_s = \frac{2\pi r N_m}{L \tan(\theta)} \quad (1)$$

Donde N_s es la velocidad rotacional [rpm] del tornillo de bolas al que va sujeta el carro móvil (ver Figura 3.1), N_m es la velocidad rotacional del mandril [rpm], r es el radio del mandril [mm], L es el avance del tornillo de bolas [mm/rev] y θ es el ángulo de bobinado deseado [23].

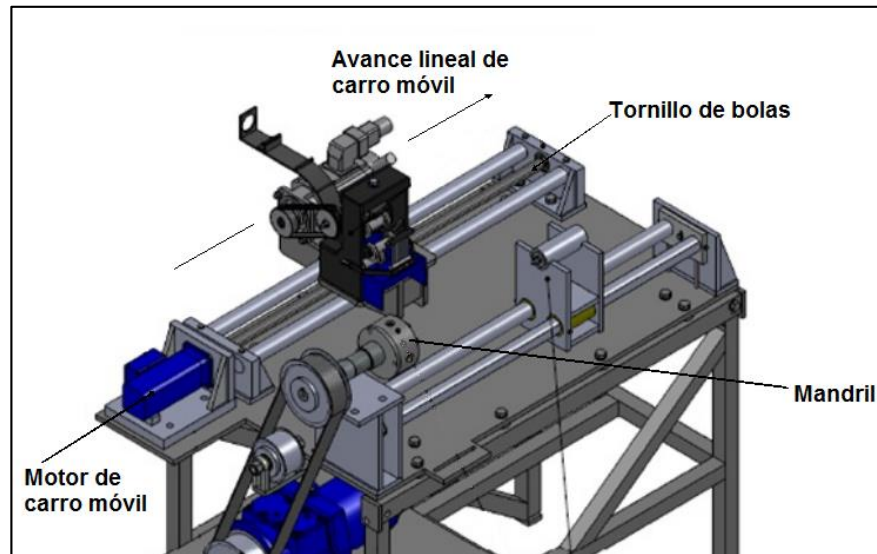


Figura 3.1. Movimiento lineal del carro móvil.

3.1. Velocidad del mandril

Por practicidad, tal como se indica en varios textos académicos, donde tratan el control de este proceso de bobinado de hilos [4] [23], la velocidad del molde debe ser constante.

Para establecer la velocidad del mandril, se aumentó gradualmente su velocidad, 1 rpm por vez, mientras se bobinaba fibra de carbono con la máxima tensión soportada por el sistema (100 N). Entonces, se encontró que la máquina no podía bobinar a velocidades menores de 4 rpm, porque la fuerza ejercida por la fibra superaba la fuerza del motor, mientras que para velocidades iguales o mayores a 4

rpm el motor es capaz de salir de su estado de inercia, y por ello realizar el bobinado de la fibra sobre el molde.

Con el fin de exigir el menor esfuerzo al controlador de tensión, se estableció la velocidad del mandril en 4 rpm, ya que a una mayor velocidad se requiere una mayor exigencia al sistema de tensión.

3.2. Velocidad del carro móvil

Para establecer la velocidad del carro móvil, se determinó el avance lineal de éste midiendo con una regla su desplazamiento horizontal para un giro de 360° del tornillo de bolas (ver Figura 3.2), el valor encontrado fue de 10 mm/rev.

De acuerdo con las láminas para las ranuras circulares de las tapas del molde, existe la posibilidad de hacer 3 tipos de anillos con los radios especificados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Radio del molde con los que cuenta la máquina.

Molde	Radio [mm]
Molde #1	60
Molde #2	80
Molde #3	100

El ángulo en el que se establece la fibra de las capas inferiores determinan las propiedades del producto final. Un ángulo de bobinado cercano a 90° ofrecerá resistencia a la compresión, mientras que patrones de bobinado con ángulos menores a 80°, típicos en sistemas de bobinado helicoidales, proporcionarán una mayor resistencia a la tracción [24]. Puesto que es de mayor utilidad una mayor resistencia a la compresión, para los anillos fibrorreforzados empleados como dispositivos médicos, se limitó el patrón de bobinado a tipo aro (Figura 1.2) restringiendo los valores de ángulo deseado entre 87° y 89°, además, si se deseara escoger un ángulo menor, influye de manera significativa otras variables que no tiene en cuenta la **ecuación (1)**, tales como el ancho de la fibra o la fricción entre fibras, por lo que habría que buscar otro modelo para la velocidad de los motores, con el fin de satisfacer el requerimiento de selección de ángulo.

Con el fin de fabricar anillos con alta resistencia radial, como se justifica en [24] y [22], se estableció un ángulo alto (89°) y se reemplazaron los valores obtenidos para los diferentes radios posibles en la **ecuación (1)**, obteniendo las velocidades mostradas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Velocidades del carro móvil para un ángulo de bobinado de 89°.

Radio [mm]	Velocidad de Carro móvil
60	2.63 rpm
80	3.51 rpm
100	4.38 rpm
$N_m = 4 \text{ rpm}, L = 10 \text{ mm/rev}, \theta = 89^\circ$	

3.3. Implementación del sistema informático IPOSplus

El programa “*IPOSplus Positioning and Sequence Control*”, de SEW EURODRIVE, perteneciente al paquete informático MOVITOOLS permite ajustar los parámetros y con ello asegurar el comportamiento de los variadores de frecuencia. En él existen dos módulos, que permiten al usuario programar los equipos en lenguaje ensamblador (IPOSplus Assembler), o en lenguaje C (IPOSplus Compiler), el módulo IPOSplus Assembler es utilizado para series de equipos antiguos como MOVIDYN y MOVITRAC31C, aunque la serie MOVIDRIVE también soporta la programación en ensamblador, se optó por programarlo con el módulo IPOSplus compiler.

A continuación se explica la implementación en IPOSplus compiler, el código fuente que controla los variadores de frecuencia MOVITRAC LTE-B y MOVIDRIVE-B MDX61B0015.

3.3.1. Cabeceras y distribución de memoria

La cabecera ‘const.h’ / ‘const.h’ define identificadores y funciones útiles para definir el comportamiento del variador de frecuencia tales como el control del bus de campo, velocidad de los motores, rampas de aceleración y desaceleración, timers, puesta a cero del encoder, etc. mientras que la cabecera ‘io.h’ / ‘iob.h’ permite el control de las entradas digitales del variador. Estas dos cabeceras son obligatorias para el control de las funciones básicas del variador mediante funciones en el código fuente.

Las variables que se manejan son de 32 bits con signo, para referirse a ellas se les antepone la letra ‘H’ y se pueden almacenar hasta 1024 de éstas, sin embargo, algunas variables de IPOS se les asignan funciones establecidas y se denominan variables del sistema (H453 - H560).

Todas las variables son globales y se almacenan en el variador, sin embargo, existe una clasificación para éstas:

Variables iniciales (*initials*): son aquellas que se almacenan en una memoria no volátil de tal manera que quedan guardadas ante un corte de energía, sólo pueden haber 128 de este tipo.

Variables auxiliares (*var*): son aquellas que usa el programa para hacer cálculos auxiliares al realizar operaciones aritméticas, mínimo se deben tener 10 según recomendación del fabricante, éstas se almacenan en una memoria volátil.

Variables globales (*globals*): son aquellas que no son usadas por el variador para cálculos auxiliares, éstas se almacenan en una memoria volátil.

Mediante la *directiva* `#pragma` se realiza la distribución de variables en la memoria del variador, como se muestra en la Figura 3.2.

```
#include <const.h>
#include <io.h>
// distribución de variables en memoria del sistema
#pragma initials 0 127 // variables que se guardan al corte de energía
#pragma globals 128 200 // variables globales
#pragma var 201 251 // variables auxiliares
```

Figura 3.2. Distribución de memoria en IPOSplus compiler.

3.3.2. Declaración de variables y estructuras de velocidad y bus de campo

Mediante la directiva `#define` se le pone una etiqueta a las variables como se muestra en la Figura 3.3. Aquellas que se indican que tienen comunicación con la interfaz (`'No_capas'`, `'ESTADO'`, `'Velocidad_Carro'`, `'Velocidad_Curado'`, `'Tiempo_Curado'` y `'Angulo_Setpoint'`) son variables que su valor provienen directamente de esta, mientras que las variables `'Contador_Capas'` y `'Timer'` se calculan internamente en el variador y van hacia la interfaz para la visualización del usuario. Hay que tener en cuenta que éstas no son todas las variables que tienen comunicación con la interfaz, ya que para el caso de la visualización del valor de tensión de la fibra se usa una variable de una estructura `MOVLNK`.

```

// definición de variables que se usan internamente
#define Bandera          H3
#define Bandera_Curado   H6
#define Velocidad_Molde  H10
#define Timer            H488
// definición de variables que se comunican con la interfaz
#define No_capas          H1
#define Contador_capas    H2
#define ESTADO            H4
#define Velocidad_Carro   H5
#define Velocidad_Curado  H7
#define Tiempo_Curado     H8
#define Angulo_Setpoint   H9
#define Temperatura       H11

// definicion de estructura SSPOSSPEED
SSPOSSPEED Speed;
// definicion de estructura GSAINPUT
GSAINPUT Analogica;
// definicion de estructura MOVLNK
MOVLNK Lectura_Tension;
MOVLNK Escritura_SPID;
MOVLNK MOV;
MLDATA Mld;
MLDATA Mld2;
MLDATA INFO_MLD;

```

Figura 3.3. Definición de variables y estructuras en IPOSplus compiler.

Las estructuras estándar de SEW EURODRIVE son conjuntos de variables globales que permiten al usuario leer y escribir parámetros del variador de frecuencia, solo por medio de estas se realiza la interacción entre el código fuente y el variador [25].

Se declaran estructuras SSPOSSPEED, GSAINPUT, MOVLNK y MLDATA como se muestra en la Figura 3.3 necesarias para el control de velocidad del carro móvil, bus de campo y lectura de la entrada análoga del variador maestro. En la tabla mostrada en el Anexo 1 tomada de [25] hay una descripción de cada una de estas.

3.3.3. Inicialización de variables y estructuras de velocidad y bus de campo

Como se observa en la Figura 3.4, se pone la velocidad del tornillo del carro móvil en 100 rpm para garantizar una rapidez mientras que el carro llega a la posición inicial donde comienza el proceso de bobinado de hilos, luego se configura las estructuras MOVLNK ('MOV', 'Lectura_Tension', 'Escritura_SPID') de tal manera que:

Estructura 'MOV':

- Tipo de bus de campo: SBUS.
- Dirección: 2 (*variador de frecuencia MOVITRAC LTE-B - molde*).
- Tipo de servicio: escritura.
- Estructura a la que apunta: INFO_MLD.

Estructura 'Lectura_Tension':

- Tipo de bus de campo: SBUS.
- Dirección: 3 (*variador de frecuencia MDX61B0022 - esclavo*).
- Tipo de servicio: lectura.
- Estructura a la que apunta: Mld.

Estructura 'Escritura_SPID':

- Tipo de bus de campo: SBUS.
- Dirección: 3 (*variador de frecuencia MDX61B0022 - esclavo*).
- Tipo de servicio: escritura.
- Estructura a la que apunta: Mld2.

```
main()
{
    // velocidad hacia la posición Inicial del Molde
    Speed.CW = Speed.CCW = 1000; // velocidad de posicionamiento, 100 rev/min [0.1 U/min]
    _SetSys( SS_POSSPEED, Speed );

    // se crean las estructuras MOVLNK para comunicación
    Lectura_Tension.BusType = ML_BT_SBUS;           // bus de campo SBUS
    Lectura_Tension.Address = 3;                     // dirección SBUS de variador esclavo
    Lectura_Tension.Format = ML_FT_PAR;              // operación sobre un parámetro
    Lectura_Tension.Service = ML_S_RD;               // servicio de lectura de parámetro
    Lectura_Tension.Index = 8331;                    // índice del parámetro (ANALOG1)
    Lectura_Tension.DPointer = numof(Mld);           // puntero hacia la estructura MLDATA

    Escritura_SPID.BusType = ML_BT_SBUS;             // bus de campo SBUS
    Escritura_SPID.Address = 3;                       // dirección SBUS del variador esclavo
    Escritura_SPID.Format = ML_FT_PAR;                // operación sobre un parámetro
    Escritura_SPID.Service = ML_S_WR;                 // servicio de escritura de parámetro
    Escritura_SPID.Index = 9014;                      // índice de parámetro (setpoint de PID)
    Escritura_SPID.DPointer = numof(Mld2);            // puntero hacia la estructura MLDATA

    MOV.BusType = ML_BT_SBUS; // tipo de comunicacion, en este caso SBUS
    MOV.Address = 2; // direccion del drive, 2 pertenece al movitrac
    MOV.Format = ML_FT_3; // variables a formatear
    MOV.Service = ML_S_WR; // escribe y guarda sobre la memoria
    MOV.DPointer = numof(INFO_MLD);
```

Figura 3.4. Inicialización de variables y estructuras.

Las estructuras MLDATA que se declaran en la Figura 3.3 se segmentan en variables de proceso de salida (PO) y de entrada (PI), éstas son enviadas en telegramas de

datos por medio del bus de campo a los variadores esclavos, la estructura del telegrama se puede observar en la Figura 3.5.

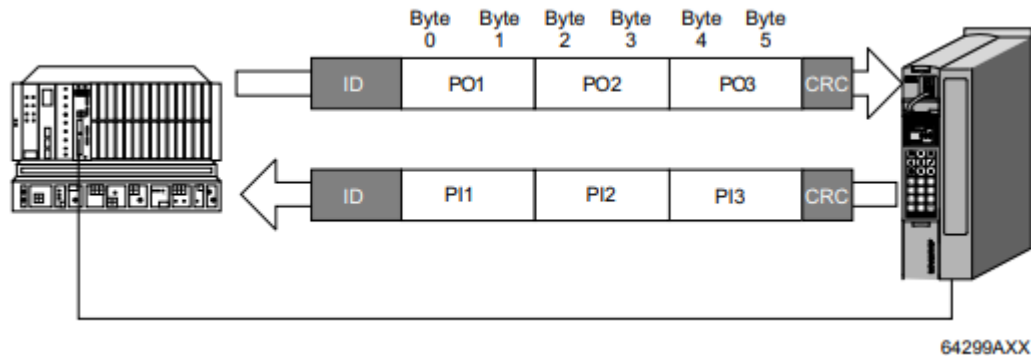


Figura 3.5. Telegrama de datos para 3 palabras del dato de proceso [26].

Si el servicio se habilita en modo escritura, las variables de proceso de entrada (PI) no son enviadas por el variador esclavo. El elemento '*process output 1*' (PO1) contiene el valor que permite que se habiliten los variadores esclavos, para habilitarlo su valor debe ser 6 [26]. El elemento PO2 de la estructura '*INFO_MLD*' (*estructura que llega al variador que controla la velocidad del molde*) contiene el valor de la velocidad del motor, por ende la velocidad inicial antes de entrar al ciclo de operación es 0, tal como se muestra en la Figura 3.6.

```
Mld.PO1 = 0x6;      // habilita comunicación con estructura MLD
Mld2.PO1 = 0x6;     // habilita comunicación con estructura MLD2
INFO_MLD.PO1 = 0x6; // habilita el esclavo con el valor 6
INFO_MLD.PO2 = 0x0; // velocidad del molde
// se pone la velocidad X [RPM], PO2 = X*(16384*21.3)/1750
_SetTask2(T2_START, Task2);
// reseteo de variables
Bandera          = 0;
Bandera_Curado   = 0;
No_capas         = 0;
Contador_capas   = 0;
ESTADO           = 0;
Velocidad_Curado = 0;
Velocidad_Carro  = 0;
Tiempo_Curado    = 0;
Angulo_Setpoint  = 89;
```

Figura 3.6. Habilitación de variadores esclavo, reseteo de variables.

Adicionalmente, se resetean las variables y se activa una tarea que se ejecuta cada milisegundo, la función de esta tarea es mantener la comunicación activa con los variadores esclavos y leer la variable análoga que registra la RTD conectada al variador, las implementación de la tarea en IPOS plus se puede observar en la Figura 3.7.

```

Task2() // tarea, comunicación con LTE-B y MDX61B0022
{
    _MoviLink(Lectura_Tension); // lectura de AI1 de MDB61B0022
    _MoviLink(Escritura_SPID); // escritura de setpoint PID en MDB61B0022
    _MoviLink(MOV); // envío de velocidad del MOVITRAC LTE-B
    _GetSys(Analogica,GS_ANINPUTS ); // lectura analógica de la PT-100
    Temperatura = Analogica.Input1;
    Speed.CW = Speed.CCW = Velocidad_Carro;
}

```

Figura 3.7. Tarea para actualizar velocidad del molde y carro móvil.

3.3.4. Ciclo principal de operación

La función ‘_AxisStop’ con el argumento ‘AS_ENABLE’ hace que se elimine cualquier restricción de movimiento del motor del carro móvil, luego con la función ‘_Go0’ y el argumento ‘GO0_U_W_ZP’ se hace que el carro móvil vaya al punto inicial del recorrido en el tornillo de bolas en cuyo punto el valor del encoder es 0.

Después se procede a enviar el carro móvil a su posición inicial en el proceso de bobinado mediante la función ‘_GoAbs’. El argumento ‘GO_WAIT’ dentro de esta función hace que no se ejecute la siguiente línea de código solo hasta que el encoder del motor del carro móvil llegue al valor especificado, que en este caso es de 43000, ya que se midió experimentalmente que el punto de inicio respecto al punto cero del encoder es de 105 mm, y se cumple la siguiente relación:

$$\frac{105 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \cdot 4096 \text{ pulsos} = 43008 \text{ pulsos} \cong 43000 \text{ pulsos} \quad (2)$$

Donde 4096 pulsos es la resolución del encoder, 10 mm es el avance por revolución y 105 mm el punto de posición inicial del carro móvil. El variador MOVITRAC LTE-B que controla el motor de rotación de molde hace un escalado con el valor nominal de la velocidad del motor (1750 rpm, dato entregado por el fabricante) y el valor 0x4000 (0x4000 = 100% Velocidad nominal) [14], sin embargo se debe tener en cuenta que el motor tiene una caja reductora de 21.3, por ende, para fijar la velocidad del molde se debe tener en cuenta la siguiente relación:

$$Valor \text{ IPOS} = Velocidad \text{ deseada} [rpm] \cdot 21.3 \cdot \frac{16384}{Velocidad \text{ nominal motor molde} [rpm]} \quad (3)$$

Se fijó la velocidad del molde usando la **ecuación (3)**, para el caso de una velocidad deseada de 4 rpm el valor IPOS es 798, el valor se guarda en la variable ‘Velocidad_Molde’ antes del ciclo principal de operación, sin embargo, para que el motor de molde comience a girar a dicha velocidad este valor se debe ingresar en el elemento PO2 de la estructura ‘INFO_MLD’, acción que se realiza en el ciclo principal de operación.

La implementación en IPOS se muestra en la siguiente figura.

```
_AxisStop( AS_ENABLE );  
_Go0( GO0_U_W_ZP );  
_GoAbs( GO_WAIT, 43000 );  
  
Velocidad_Molde = 798;  
_Wait( 1000 );
```

Figura 3.8. Ubicación del carro móvil en la posición inicial del proceso.

Luego, dentro del ciclo principal se declara una estructura ‘*switch – case*’ que contiene cuatro casos de operación para el proceso de bobinado de hilos.

El primer caso (*CASE 0*) tiene como finalidad detener la rotación del molde, acción que se realiza poniendo el elemento PO2 de la estructura ‘*INFO_MLD*’ en cero. La función de este estado es poner pausa al proceso en caso de fallas o en caso de cambiar de la etapa de bobinado a la etapa de curado, también leer constantemente la velocidad del carro móvil si se fija un ángulo de bobinado diferente al inicial. Cabe resaltar que si se desea la construcción de un nuevo anillo, se debe ejecutar este caso y posteriormente el cuarto caso, para resetear las variables establecidas para el anillo anterior.

El segundo caso (*CASE 1*) tiene como finalidad mover el carro móvil para crear las capas de fibra del anillo y asegurar el ángulo de bobinado con la velocidad calculada desde la interfaz de usuario. El recorrido es de 21,24 mm el cual se calculó experimentalmente asegurando que la fibra de carbono recubriera todo el ancho de la lámina del molde. La instrucción que hace que el carro móvil ejecute un movimiento horizontal, no permite que se ejecute la siguiente instrucción hasta que el carro móvil se detenga y se complete una capa sobre el anillo, asegurando que al detener el proceso, las capas con las que quede el anillo no hayan sido interrumpidas.

La implementación de los dos primeros casos se puede ver en la Figura 3.9

```

switch(ESTADO)
{
    case 0 :
        INFO_MLD.PO2 = 0;
        break;

    case 1 :
        Speed.CW = Speed.CCW = Velocidad_Carro;
        _SetSys( SS_POSSPEED, Speed );
        if(Contador_capas < No_capas)
        {
            INFO_MLD.PO2 = Velocidad_Molde;
            if(Bandera == 0)
            {
                _GoRel( GO_WAIT, -8700 );
                Bandera = 1;
            }
            else
            {
                _GoRel( GO_WAIT, 8700 );
                Bandera = 0;
            }
            _Wait( 500 );
            Contador_capas = Contador_capas + 1;
        }
        else
        { ESTADO = 0; }
        break;
}

```

Figura 3.9. Implementación del estado de parada y el estado de bobinado.

El tercer caso (*CASE 2*) controla la velocidad del molde para la etapa de curado del anillo, además se utiliza el *TIMER1* el cual es un contador descendente de 31 bits cuyo rango de cuenta es desde 0 ms hasta $2^{31}-1$ ms. Cuando el sistema entra en este caso, se lee el valor de la variable '*Tiempo_Curado*' puesto desde la interfaz y se le asigna al contador descendente, mientras el tiempo termina se puede variar la velocidad del molde, cuando acabe el tiempo el sistema volverá al estado de parada (Caso 0).

El cuarto y último caso (*CASE 3*) se implementa para resetear las variables del sistema y comenzar el bobinado de un nuevo anillo si es deseado por el usuario.

El proceso ideal para comenzar la fabricación de un anillo es llevar el sistema al primer caso (pausa) y posteriormente ejecutar el cuarto caso (reseteo de variables), sin embargo, es posible omitir llevar al sistema al primer caso, ya que al pasar directamente por el estado de reseteo, la variable '*ESTADO*' vuelve a cero, haciendo que el sistema vuelva al estado de pausa y no prosiga con el bobinado que se estaba ejecutando.

La implementación de estos dos últimos casos explicados se muestran en la Figura 3.10.

```
case 2 :  
    INFO_MLD.PO2 = Velocidad_Curado;  
    if(Bandera_Curado == 0)  
    {  
        H488 = Tiempo_Curado;  
        Bandera_Curado = 1;  
    }else  
    {  
        if(H488 == 0)  
        {  
            ESTADO = 0;  
        }  
    }  
    break;  
case 3 :  
    Bandera          = 0;  
    Bandera_Curado   = 0;  
    No_capas          = 0;  
    Contador_capas    = 0;  
    Velocidad_Curado  = 0;  
    Velocidad_Carro   = 0;  
    Tiempo_Curado     = 0;  
    Angulo_Setpoint   = 89;  
    ESTADO            = 0;  
    Timer = 0;  
    break;  
}
```

Figura 3.10. Implementación del estado de curado y el estado de reset.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.11, se explica el funcionamiento del programa principal, que opera en el variador de frecuencia maestro Movidrive MDX61B0015. El usuario inicia en el estado de parada '0' hasta que se envíe desde la interfaz un nuevo estado. Para construir un anillo se debe ingresar inicialmente los parámetros del anillo y luego pasar al estado '1' de bobinado, cuando acabe el número de capas el sistema vuelve a estar en el estado '0', luego de acabar el bobinado se pasa a la etapa de curado mediante el estado '2', y luego de haber transcurrido el tiempo de curado el sistema vuelve nuevamente al estado '0'. Si se desea la construcción de otro anillo se debe resetear las variables mediante el estado '3' y volver a repetir el proceso.

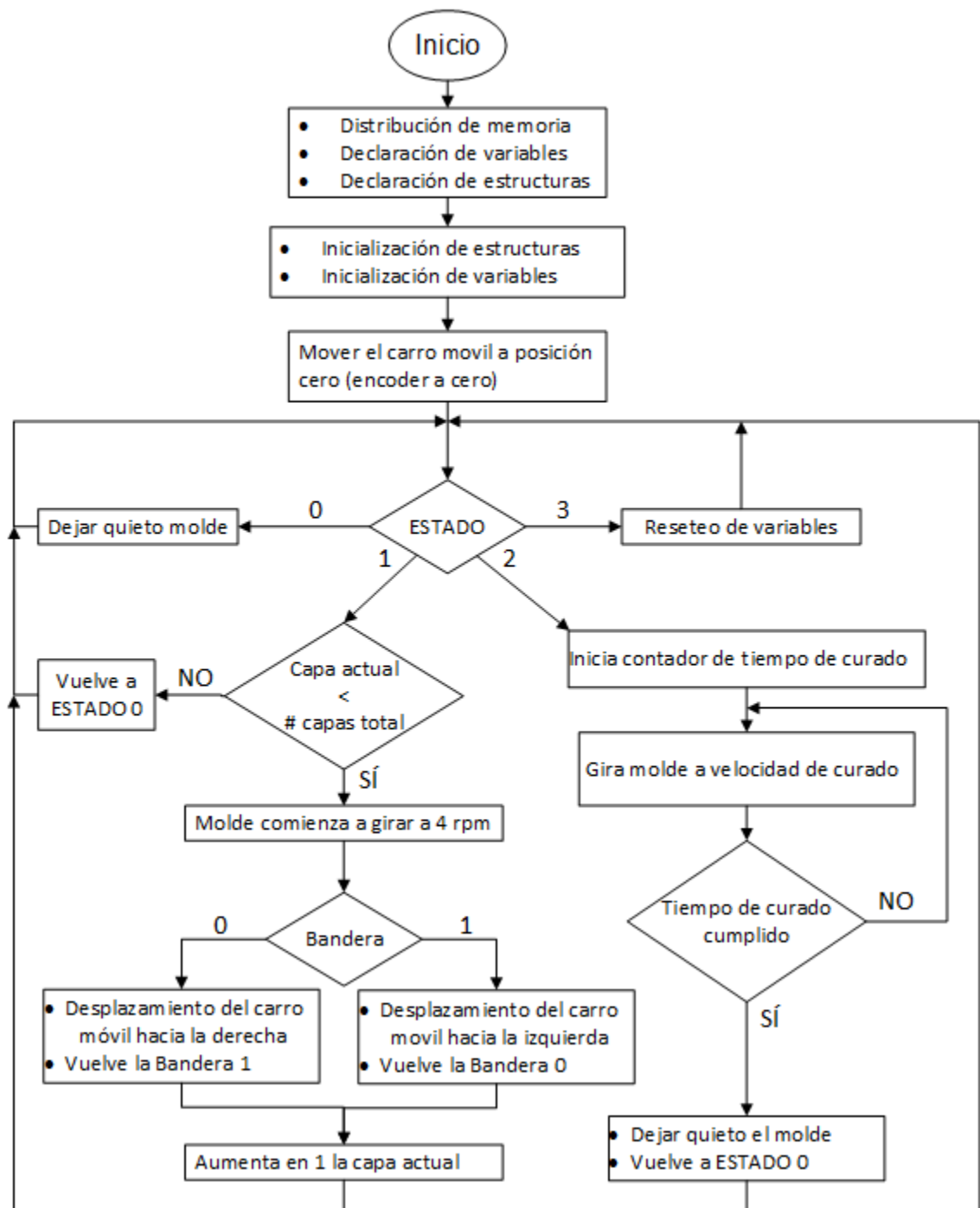


Figura 3.11. Diagrama de flujo del programa en el variador MDX61B0015.

3.4. Prueba de funcionamiento

Se realizó una prueba en la máquina, usando cabuya sintética, para validar si el patrón de bobinado era el correcto, ajustando las velocidades dadas en la Tabla 3.2. Inicialmente se corroboró de manera visual, verificando el cubrimiento de toda la lámina del molde, ver la imagen izquierda de la Figura 3.12 donde se resalta con flechas el patrón completo de bobinado, llegando hasta la intersección de la lámina con las tapas laterales. También se sobrepuso el primer cuadrante de un plano polar para corroborar visualmente el ángulo de bobinado, en la imagen derecha de la Figura 3.12 se pueden observar las fibras de cabuya, formando un ángulo muy cercano a 90° respecto al eje del anillo, logrando una estructura con bobinado en aro como se esperaba.

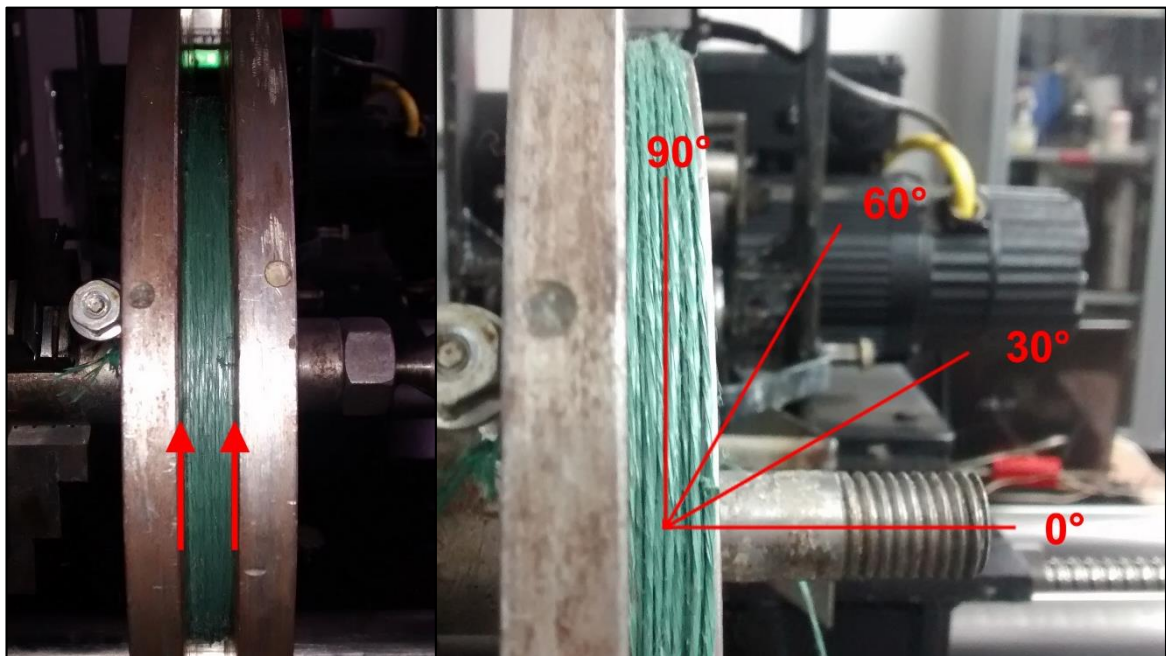


Figura 3.12. Resultados de bobinado con cabuya para un ángulo de 89° .

Posteriormente se realizó la prueba con fibra de carbono, sin resina, para determinar el resultado del patrón de bobinado y la cobertura de la fibra, obteniendo de igual manera que con la cabuya, un patrón de bobinado en aro que abarca toda la superficie de la lámina del molde.

3.5. Lectura de temperatura

Con el fin de sensar la temperatura del flujo de aire, que expulsa la pistola de calor, y mostrarla en la interfaz mientras se realiza el proceso de fabricación de un anillo fibrorreforzado, se adquiere el dato por una entrada análoga del variador maestro, donde se conecta un sensor de temperatura RTD 805.

3.5.1. Conexión y acondicionamiento de la RTD 805

Se procede a realizar la conexión mostrada en la Figura 3.13. La fuente de 24 voltios mostrada se tomó de las borneras X10:9 y X10:10 que posee el variador y las borneras de lectura analógica son las X11:2 y X11:3 (ver Figura 3.14).

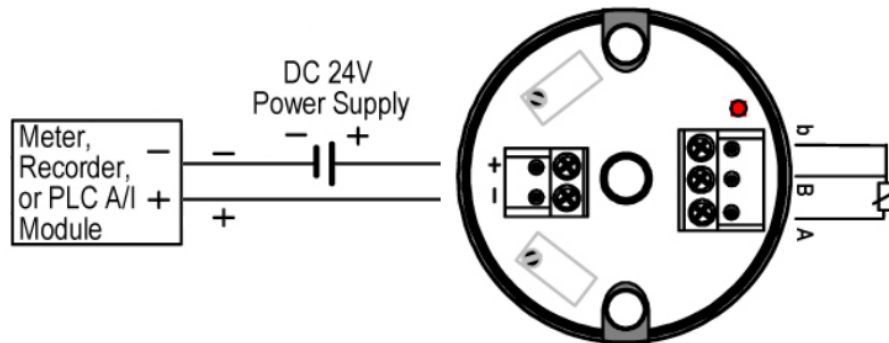


Figura 3.13. Esquema de conexión de la RTD 805 [17].

La entrada analógica AI1 de los variadores MOVIDIRVE B se puede configurar para que la señal recibida sea de corriente o de voltaje bipolar o unipolar según la conexión, la configuración de fábrica es recibir señales de voltaje unipolares o bipolares [13], sin embargo, se cambió con el switch S11 del variador principal mostrado en la Figura 3.14 con el fin de realizar la correcta conexión y acondicionamiento de la RTD 805 mediante el lazo de corriente mostrado en la Figura 3.13.

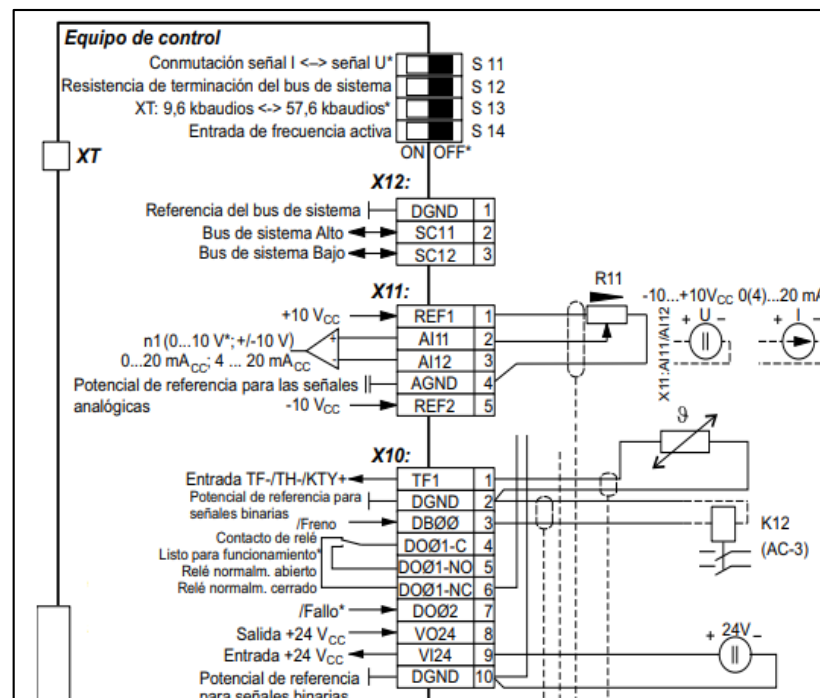


Figura 3.14. Bornes de entrada analógicas para un MOVIDIRIVE B [13].

El transmisor de temperatura cuenta con unos DIPSWITCH y unos trimmers que permiten ajustar el offset y el span de la medición; en este caso se ajustó para un offset de 0 °C y de un span de 100 °C, haciendo que el rango de medición del transmisor quede ajustado para 0 a 100 °C

3.5.2. Lectura en IPOS

La lectura de temperatura se realiza cada milisegundo, en una tarea definida dentro del programa principal del variador. Los valores guardados en la estructura de IPOS llamada '*Analogica*' varían dentro del rango especificado en la Tabla 3.3 para valores entre 4 – 20 mA entregados por el transmisor de temperatura.

Tabla 3.3. Rangos para las entradas analógicas AI1 – AI2 [25].

Rango de entrada	Rango de variable de IPOS
-10 ... 0 ... 10 V	-10000 ... 0 ... 10000
0 ... 10 V	0 ... 10000
0 ... 20 mA	0 ... 5000
4 ... 20 mA	1000 ... 5000

El rango configurado para el transmisor de temperatura es de 0 a 100 °C, para una corriente de salida entre 4 y 20 mA y para un valor en el registro de IPOS entre 1000 y 5000 según la Tabla 3.3. Acorde a esto, se consignan los rangos de temperatura, corriente y valor IPOS en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Rangos manejados en la lectura de temperatura.

Temperatura [°C]	Corriente [mA]	Valor IPOS
0	4	1000
100	20	5000

Con los datos de la tabla anterior, se obtuvo la **ecuación (4)** la cual relaciona la temperatura leída por la RTD y el valor del registro IPOS y se utiliza posteriormente en la interfaz gráfica para mostrar el valor de temperatura medida al operario de la máquina bobinadora.

$$Temperatura [^{\circ}C] = 0.025 \cdot Registro\ IPOS - 25\ ^{\circ}C \quad (4)$$

4. CONTROL DEL SISTEMA DE TENSION

La máquina se diseñó con un sistema de tensión, conformado por: un motor de frenado, poleas dentadas, correa y rodillos recubiertos con caucho. El funcionamiento se basa en frenar por fricción la fibra, lo cual ocurre cuando ésta pasa entre los rodillos. Controlando la velocidad de rotación del motor de freno se consiga mantener una tensión constante en la fibra. El sistema de tensión nunca fue puesto en funcionamiento, inhabilitando el control del parámetro de fabricación de mayor impacto en las características del producto final. Por lo que se puso en funcionamiento el sistema acondicionando una celda de carga, e implementando una ley de control PI, en el variador que controla el motor de freno.

4.1. Conexión y acondicionamiento de la celda de carga

4.1.1. Regulador de tensión

El variador de frecuencia MOVIDRIVE MDX61B0022, al que se conecta la celda de carga, cuenta con una fuente de alimentación de 24 V, valor que sobrepasa el límite de la alimentación de 15 V para la celda de carga TCLZ 2KNA, especificado por el fabricante, por lo que se hace necesario realizar un circuito regulador de tensión para 12 V. El esquema del circuito diseñado se puede ver en la Figura 4.1.

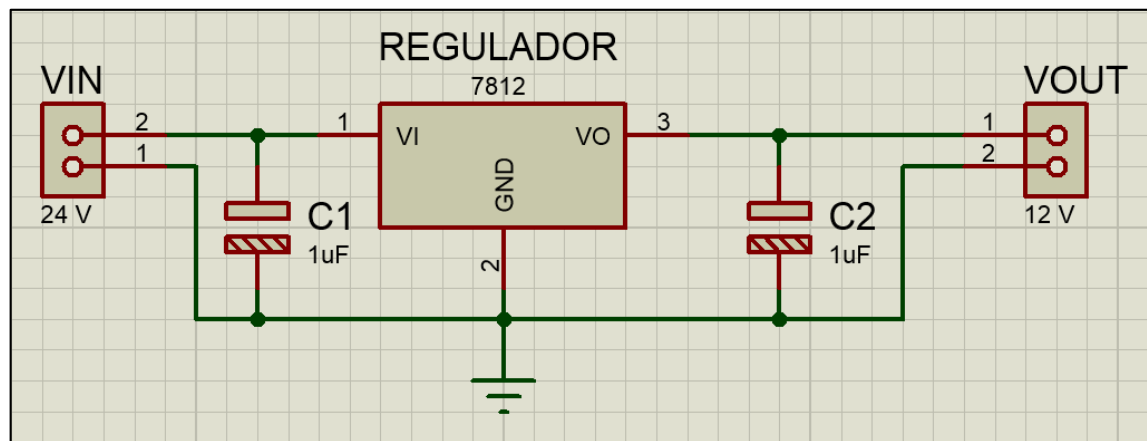


Figura 4.1. Circuito regulador de tensión de 12V en proteus 8.3 SP2.

Una vez definido el diseño, se realizó el diseño de la placa de circuito impreso con la herramienta ARES de proteus 8.3 SP2 mostrado en la Figura 4.2.

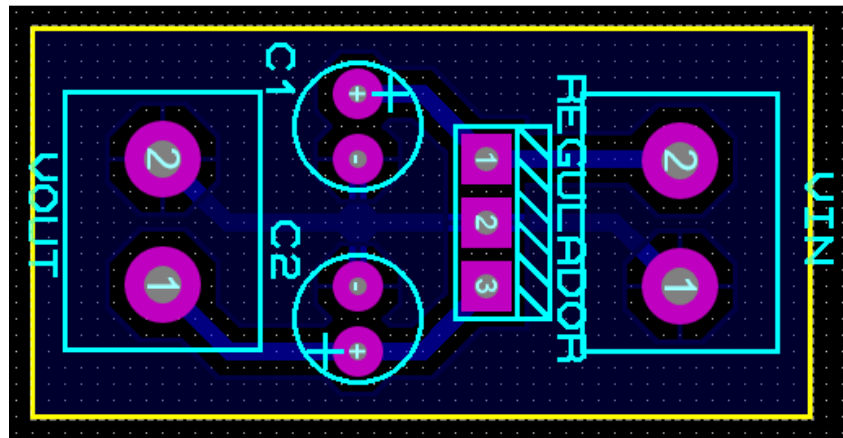


Figura 4.2. Diseño de la PCB en ARES, herramienta de proteus 8.3 SP2.

Se utilizó el circuito integrado KIA7812PI que tiene como corriente de salida máxima 1 A. Puesto que la resistencia de entrada de la celda de carga reportada por el fabricante es de $350\ \Omega$, y la tensión de salida se supone idealmente de 12 V, la corriente nominal del circuito a la cual va a ser sometido es de 34,29 mA, suficiente para el integrado seleccionado. En la Figura 4.3 se pueden observar el modelo 3D y el circuito físico montado.

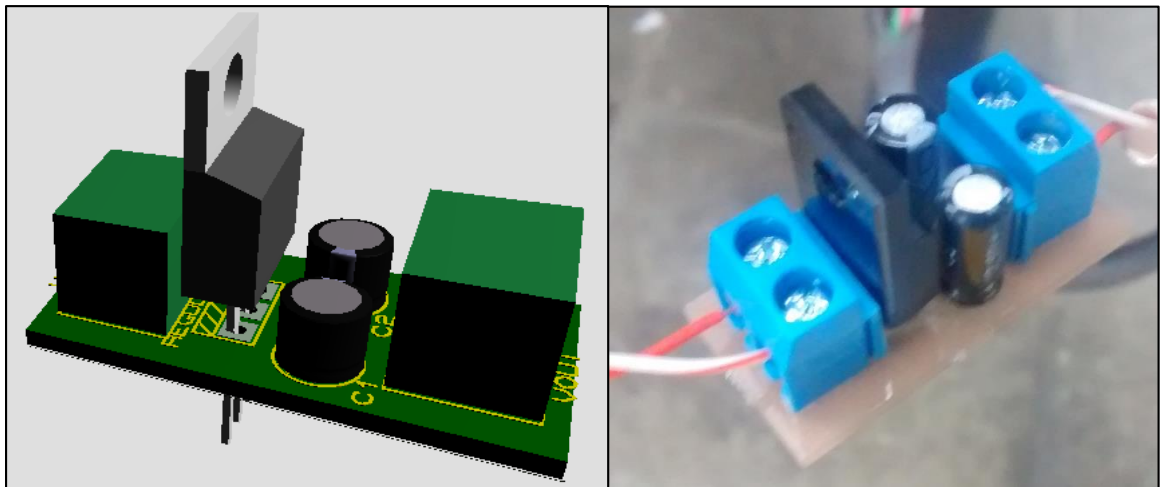


Figura 4.3. Izq: modelo del circuito en 3D, der: circuito montado en PCB.

Luego se verificó su funcionamiento midiendo la tensión de salida del circuito ya montado en el sistema con un multímetro UNI-T UT33, se realizaron tres mediciones las cuales se consignaron en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Valores medidos en la salida del regulador de tensión.

Medición # 1	12,15 V
Medición # 2	12,16 V
Medición # 3	12,16 V
Promedio	12,16 V

Se utilizó el valor promedio de 12,16 V para determinar la expresión de voltaje de salida en la celda de carga, la cual es:

$$V_o = 2 \frac{mV}{V} \cdot 12.16 V \cdot \frac{T}{2KN} \quad (5)$$

Donde T es la tensión a la que es sometida la celda de carga dada en Newton, 2 mV/V es la sensibilidad de la celda de carga y 2 KN su capacidad máxima de carga.

4.1.2. Ajuste del acondicionador DRF-LC

El acondicionador de la celda de carga cuenta con once puentes internos y dos trimmers (Figura 4.4) que ajustan el rango de la señal de entrada y de salida, offset y span.

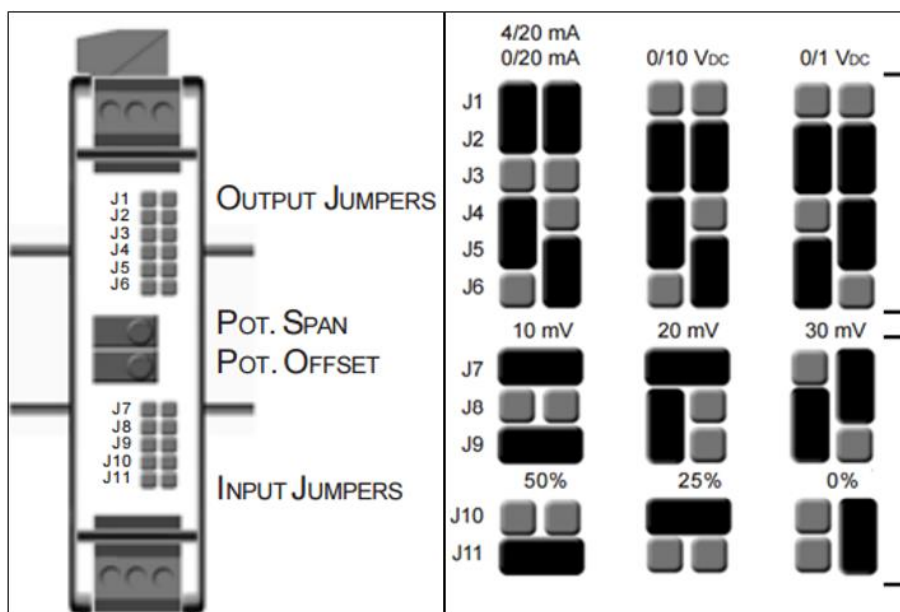


Figura 4.4. Potenciómetros y puentes de ajuste del acondicionador DRF-LC [27]

En la Figura 4.4 se observa que el rango de entrada es ajustado mediante los puentes J7 - 9, el rango de salida se ajusta mediante los puentes J1 - 6 y el offset mediante J10 - 11 o mediante un potenciómetro.

El acondicionador se ajusta como se muestra en la Tabla 4.2, en donde el rango de entrada permite tener tensiones entre 0 y 822 N (rango estimado usando la **ecuación (5)**), y el rango de salida concuerda con el rango de entrada analógica en el variador de frecuencia.

Tabla 4.2. Ajuste realizado en el acondicionador

Rango de entrada	1 - 10 mV
Rango de salida	1 - 10 V
Relación	1:1000

Tomando en cuenta la **ecuación (5)** y la relación mostrada en la Tabla 4.2, la salida de voltaje del acondicionador se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = 1000 \cdot 2 \frac{mV}{V} \cdot 12.16 V \cdot \frac{T}{2KN} \quad (6)$$

4.1.3. Conexión al variador de frecuencia MOVIDRIVE MDX61B0022

Se conectó la celda de carga mediante el acondicionador al variador de frecuencia MOVIDRIVE MDX61B0022, tal cual se muestra en la Figura 4.5.

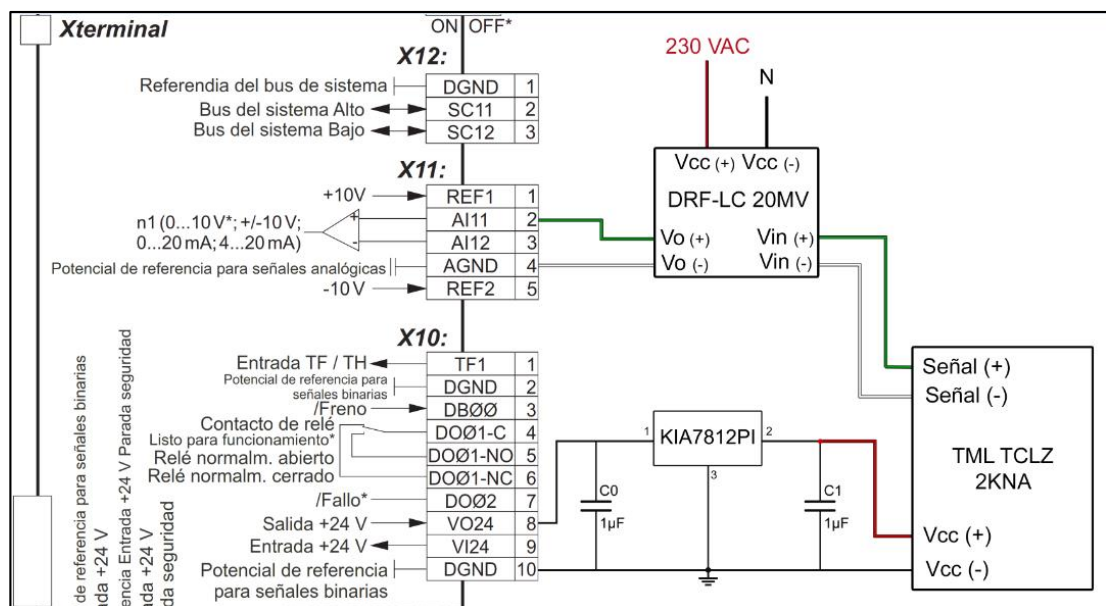


Figura 4.5. Conexión de celda de carga al variador MDX61B0022.

Los valores de la palabra de la entrada analógica AI1 en el software de programación IPOS plus de MOVITOOLS dependiendo el rango de valores de entrada se

muestran en la Tabla 3.3, mediante ésta se obtiene la **ecuación (7)** que relaciona el valor de la palabra IPOS plus con la tensión que se ejerce sobre la celda de carga.

$$\text{Palabra IPOS} = 1 \cdot 10^6 \cdot 2 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \cdot 12.16 \text{ V} \cdot \frac{\text{T}}{2\text{KN}} \quad (7)$$

4.1.4. Ajuste de OFFSET

Se utilizó la herramienta SCOPE, del paquete de software MOVITOOLS, para registrar los valores de la celda de carga en el tiempo. En el código fuente, del variador de frecuencia MDX61B0022, desarrollado en IPOS plus, asocia la variable IPOS H33 a la entrada Análoga AI1.

Se exportaron los datos al software de programación MATLAB R2016a, para una mejor visualización y estudio, ya que en MOVITOOLS no es posible convertir los datos del registro H33 en tensión. En la Figura 4.6 se tomó registro de la celda de carga, sin haber estado sometida a ninguna fuerza, y usando la **ecuación (5)** y **(7)** se realizó la conversión de los datos a valores de tensión y voltaje, presentes en la celda de carga.

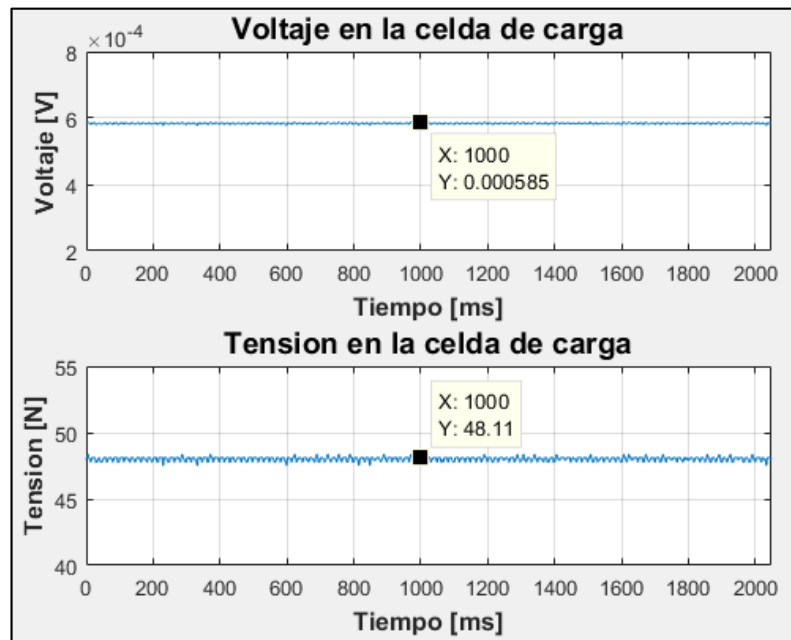


Figura 4.6. Componente de offset en la celda de carga.

Se encontró que existe una señal de OFFSET, en la celda de carga, de 0,58 mV, que equivalen en tensión a 48,11 N, por lo que se realizó un ajuste mediante el potenciómetro de offset del acondicionador, hasta que esta componente indeseada sea reducida y en lo posible eliminada.

Se volvió a tomar lectura de la celda de carga con el ajuste realizado y se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 4.7, en la componente de OFFSET se atenúa considerablemente a $-2 \mu\text{V}$ lo cual es equivalente a -0.16 N .

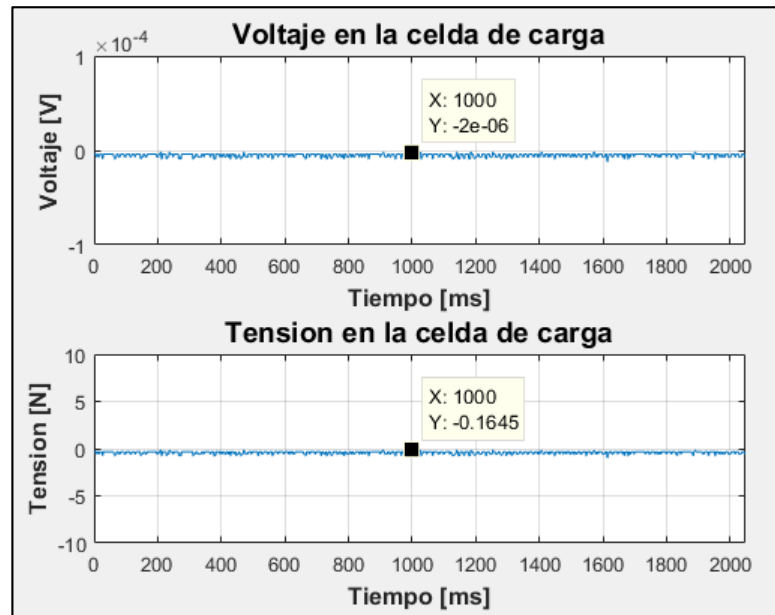


Figura 4.7. Componente de offset eliminada en la lectura de la celda de carga.

4.2. Ajuste de los parámetros PID del variador de frecuencia MDX61B0022

Inicialmente se configuraron los parámetros del variador de frecuencia MDX61B0022 que permiten realizar un control PID como se muestra en las Figura 4.8 y Figura 4.9.

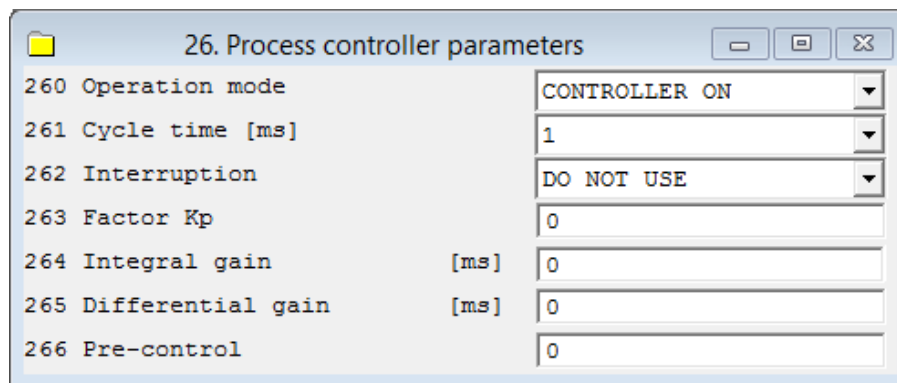
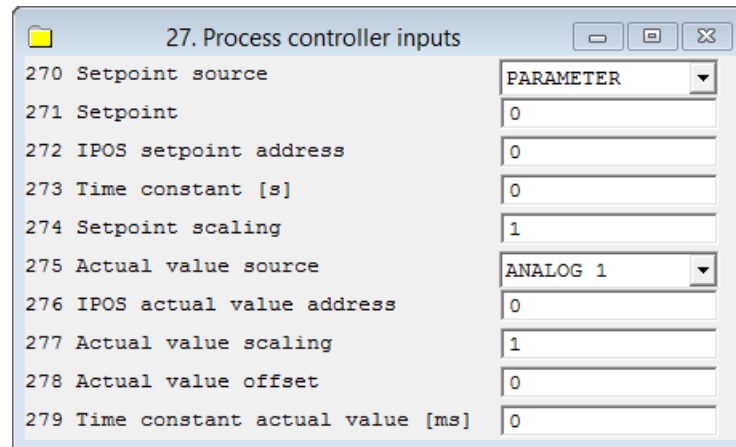


Figura 4.8. Configuración de los parámetros generales del controlador PID.

El control se habilita mediante el parámetro 260; con el parámetro 261 se escoge el ciclo de operación más pequeño cuyo valor es de 1 ms ; el parámetro 262 define como actúa el controlador antes una interrupción en el código fuente, debido a que estas no son programadas no es necesario habilitar dicha opción; con los

parámetros 263, 264 y 265 se escogen las constantes del controlador que definen su respuesta dinámica y estática.



Parameter ID	Parameter Name	Value / Source
270	Setpoint source	PARAMETER
271	Setpoint	0
272	IPOS setpoint address	0
273	Time constant [s]	0
274	Setpoint scaling	1
275	Actual value source	ANALOG 1
276	IPOS actual value address	0
277	Actual value scaling	1
278	Actual value offset	0
279	Time constant actual value [ms]	0

Figura 4.9. Configuración de los parámetros de entrada del controlador PID.

Con el parámetro 270 se escoge de donde se obtiene el valor de referencia del controlador, puesto que este es definido por el usuario a través de la interfaz gráfica; se escoge que la fuente de la referencia sea un parámetro (parámetro 271) para que pueda ser modificado por el variador maestro a través del bus de campo; el parámetro 272 indica la dirección de una variable IPOS del código fuente usado como setpoint en el controlador del variador de frecuencia, sin embargo en este caso no se usa ya que el setpoint se fija desde un parámetro y no desde una variable; el parámetro 273 sirve para activar un generador de rampa en el valor de setpoint, en este caso no es necesario usarlo ya que el valor del setpoint viene desde el variador principal; el parámetro 275 indica que la señal de realimentación será la entrada análoga ANALOG 1, que para la máquina es la lectura de la celda de carga.

Finalmente se configuran los límites del controlador, los parámetros 280 y 281 definen los límites del Offset que se suman a la referencia del controlador; los parámetros 282 y 283 definen los límites de la componente PID calculada y los parámetros 284 y 285 definen los límites totales del controlador, esto ya que con el parámetro 266 se le puede sumar un offset a la salida del controlador (ver Figura 4.10).

28. Process controller limits	
280 Minimum offset + actual value	-10000
281 Maximum offset + actual value	10000
282 Minimum output PID-controller	-300
283 Maximum output PID-controller	300
284 Minimum output process-controller	-7500
285 Maximum output process-controller	7500

Figura 4.10. Configuración de los límites del controlador PID.

4.3. Implementación en IPOSplus

Se adicionaron las cabeceras 'constb.h' y 'iob.h' para el manejo de funciones básicas de IPOS, se crean las variables '*sentido*' para controlar el sentido de giro del motor de freno y '*LCCarga*' para registrar la lectura del valor analógico que entrega la celda de carga. Luego se procede a crear la estructura SSPOSSPEED para el perfil de velocidad y la estructura GSAINPUT para el registro de lecturas analógicas por la bornera X11:1 y X11:2 del variador. Lo anterior es mostrado en la Figura 4.11.

```
#include <constb.h>
#include <iob.h>
#define sentido H1      // 128 CW | -128 CCW | 0 STOP
#define LCCarga H33

SSPOSSPEED Speed;
GSAINPUT Analogica;
```

Figura 4.11. Declaración de estructuras y variables en el variador MDX61B0022.

A algunas variables de IPOS se les asignan funciones de conjunto y se les denomina variables del sistema, estas variables son no volátiles y en ellas se encuentran los parámetros del controlador PID paralelo, su rango es H540 – H559 [25]. Con el fin de evitar un movimiento brusco en el inicio del proceso, se resetea la salida de las componentes PID antes del ciclo principal de operación del programa, luego se hace girar el motor 128 pasos del encoder indefinidamente mediante la variable '*sentido*' para que el motor de freno gire en la misma dirección de la fibra y posteriormente sea controlada su velocidad. Lo anterior se muestra en la Figura 4.12

```

main()
{
    H542 = 0;          // RESETEO DE VALOR DE COMPONENTE KP
    H543 = 0;          // RESETEO DE VALOR DE COMPONENTE TI
    H544 = 0;          // RESETEO DE VALOR DE COMPONENTE TD

    sentido = 128;
    _GoRel( GO_NOWAIT, sentido );
}

```

Figura 4.12. Reseteo de la salida de componentes del controlador PID.

Dentro del ciclo principal de operación del variador que controla el motor de freno se lee constantemente el valor del registro de la celda de carga y se guarda en la variable 'LCCarga', esto con fines de tomar muestras de tensión cuando se esté realizando un análisis del funcionamiento del sistema. Lo anterior se muestra en la Figura 4.13.

```

while(1)
{
    _GetSys(Analogica,GS_ANINPUTS );
    LCCarga = Analogica.Input1;

    Speed.CW = Speed.CCW = 300 - IPOS_Setp; //limite de PID menos señal de control
    _SetSys( SS_POSSPEED,Speed );
}
}

```

Figura 4.13. Ciclo principal de operación para sistema de Tensión.

Adicionalmente, se está calculando la salida del controlador PID y restando al límite superior de control para definir constantemente la velocidad del motor de freno, esto con el fin de que cuando se prenda la máquina bobinadora la salida del controlador aumente y llegue a su valor máximo, restringiendo el giro del motor de freno mientras comienza el proceso. Una vez definidas las características del anillo desde la interfaz e iniciada la etapa de bobinado, el molde comenzará a girar halando la fibra y creando tensión en la celda de carga haciendo que la salida del controlador disminuya y se regule la tensión hasta que el error entre la tensión deseada y la leída por la celda sea cero.

El sistema de tensión que ejerce sobre la máquina se entiende mejor observando la Figura 4.14. En ella, el valor de tensión se convierte en un registro IPOS mediante una constante K1, luego entra a una bucla cerrada en donde la salida del controlador se resta a su límite superior. La señal de control define la velocidad del motor y la tensión ejercida sobre la fibra se lee y se compara con la tensión deseada.

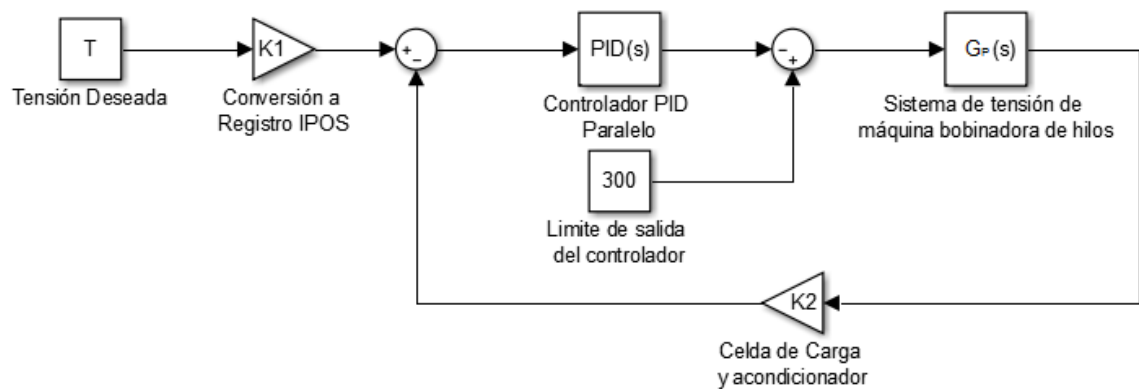


Figura 4.14. Diagrama de bloques para el sistema de tensión.

4.4. Ajuste del controlador mediante método de Ziegler-Nichols

El método de Ziegler-Nichols, permite ajustar o "sintonizar" un regulador PID de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o sistema controlado. El método se aplica mediante los siguientes pasos:

1. Usar sólo el control proporcional con ganancia proporcional K pequeña.
2. Aplicar escalones de pequeña señal y observar la señal de control, aumentando progresivamente la ganancia proporcional K , hasta observar una oscilación sostenida; la oscilación debe ser lineal y no debe confundirse con las variaciones producidas por amplificación del ruido de medición.
3. Registrar la ganancia para la cual se obtiene la oscilación y denominarla ganancia crítica $K_p = K$, y el periodo de esta oscilación P_{cr} .

Luego de obtener estos dos parámetros, se ajusta el controlador PID de acuerdo con la siguiente tabla [28]:

Tabla 4.3. Ajuste PID mediante el método Ziegler-Nichols [28].

Acción	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_p$	-	-
PI	$0.45 K_p$	$0.5 P_{cr}$	-
PID	$0.6 K_p$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Inicialmente, se fue modificando el valor de la constante proporcional, hasta encontrar en la respuesta oscilaciones sostenidas, el valor de K_p hallado fue de 0.33 y el periodo crítico P_{cr} fue de 288 ms, en la Figura 4.15 se muestran las oscilaciones sostenidas y dos picos de la onda señalados, cuya diferencia de tiempo es el periodo medido.

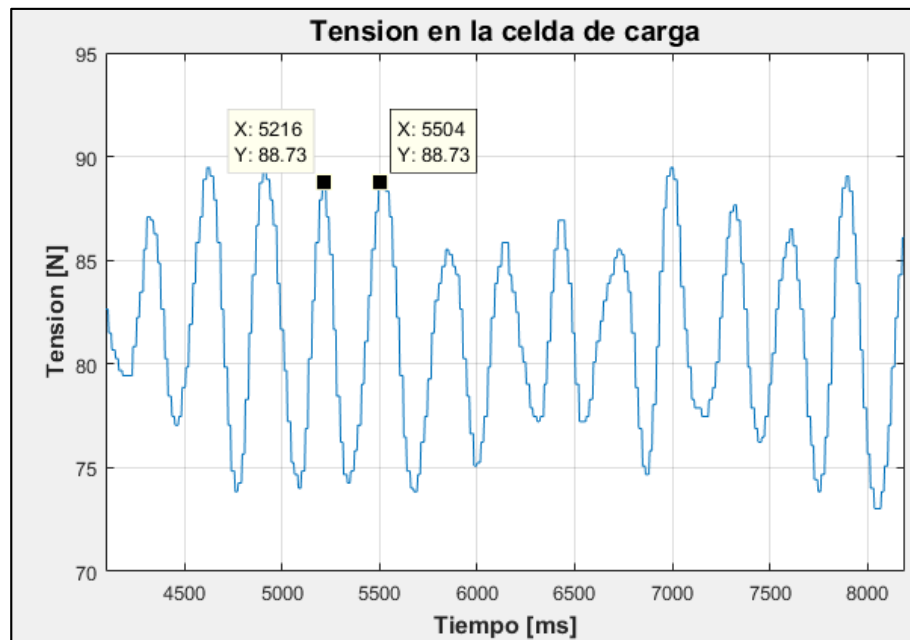


Figura 4.15. Oscilaciones sostenidas con fibra de carbono.

Luego, se procedió a calcular los parámetros del controlador PI, usando las ecuaciones mostradas en la Tabla 4.3 y los valores de K_{cr} y P_{cr} , dando como resultado una constante proporcional K_p de 0.148 y una constante integral T_i de 144 ms, los resultados de la respuesta para un setpoint de 20 N usando este controlador PI se evidencia en la Figura 4.16.

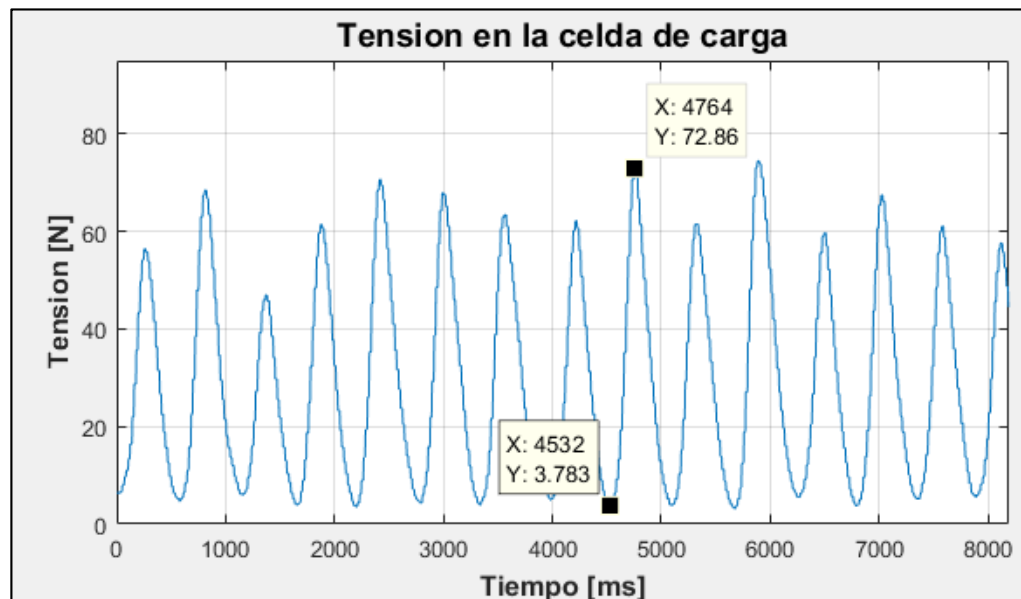


Figura 4.16. Respuesta del sistema con fibra de carbono para un controlador PI.

Se observa claramente que, al aplicar el método de Ziegler-Nichols, usando fibra de carbono no permite que la respuesta continua del sistema se estabilice en el setpoint de tensión deseado, el sistema es inestable con el controlador calculado, por lo que se optó por usar el método heurístico para determinar los parámetros óptimos del controlador PI, que permitan un sistema estable.

4.5. Ajuste del controlador mediante método heurístico

Los métodos empíricos de ajuste, han sido una manera de ajustar controladores PID a partir de mediciones realizadas sobre la planta real y usando una regla heurística para su ajuste. Ha sido ampliamente aceptado y utilizado alrededor del mundo, porque permite ahorrar esfuerzo en el modelado de la planta [28]. El método aplicado a la máquina bobinada de hilos sigue la siguiente metodología explicada en [29]:

1. Teniendo el sistema en lazo cerrado, partir de valores bajos de K_p y sin acción integral o derivativa.
2. Aumentar K_p hasta evitar sobrepasos excesivos en la respuesta.
3. Disminuir T_i hasta eliminar el error estacionario.

Aplicando la metodología anterior, se obtuvo que el mejor valor para K_p fue de 0.26 y para T_i de 700 ms. Se realizó la misma prueba con el método anterior para un setpoint de 20 N y los resultados mejoraron considerablemente como se muestra en la Figura 4.17, donde se evidencia que el valor máximo de tensión fue de 23,19 N, su valor mínimo de 17,52 N y su valor promedio de 20,15 N, mientras que en la respuesta de la Figura 4.16 se obtuvo como valor máximo 72,86 N y valor mínimo 3,78 N.

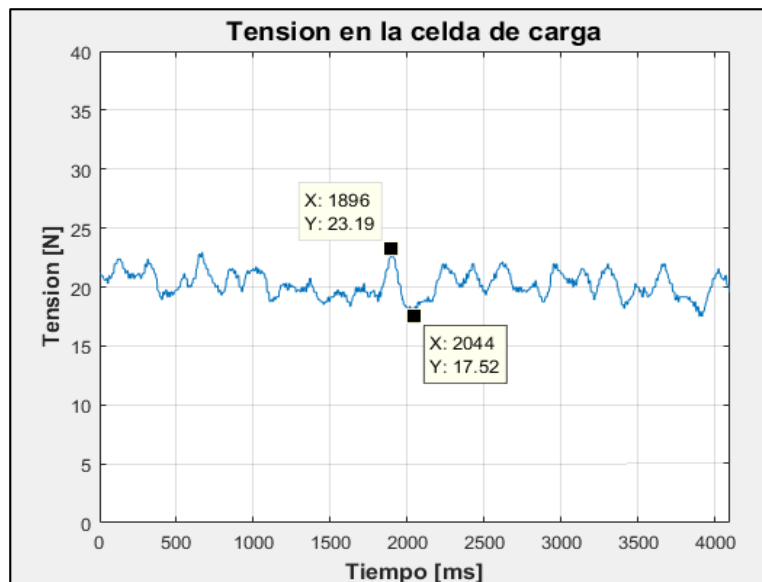


Figura 4.17. Respuesta del sistema en tensión para un setpoint de 20 N.

Adicionalmente se aplicaron 11 valores diferentes de referencia para comprobar la estabilidad del sistema y que el error estacionario sea lo más cercano posible a cero, los resultados se muestran en la Figura 4.18. Existe un ruido presentado en la respuesta de tensión inherente al sistema.

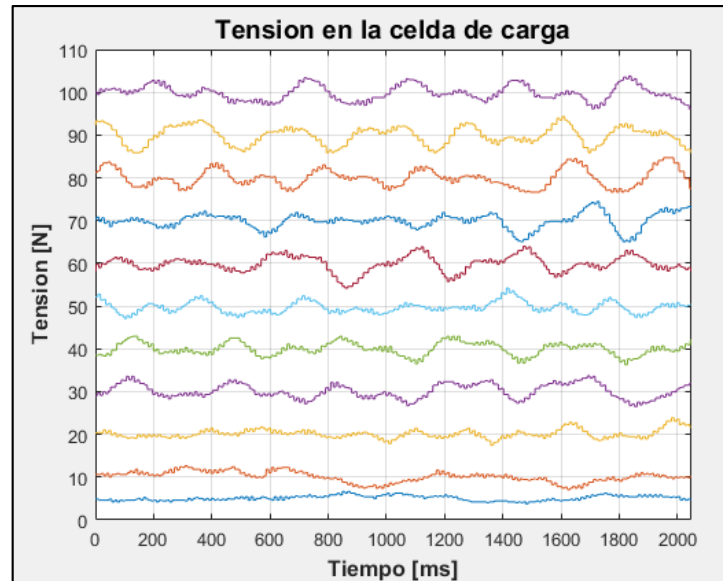


Figura 4.18. Respuesta del sistema en tensión para diferentes setpoints.

Los valores de referencia de tensión de la figura anterior se muestran en la Tabla 4.4 junto al valor máximo, mínimo y promedio de las muestras tomadas.

Tabla 4.4. Respuesta del sistema en tensión para diferentes setpoints.

Tensión deseada		Valor máximo		Valor mínimo		Valor promedio		% de oscilación respecto ref.	
5	N	6,66	N	3,78	N	5,10	N	28,80	%
10	N	12,66	N	7,07	N	10,09	N	27,95	%
20	N	23,19	N	17,52	N	20,15	N	14,18	%
30	N	33,72	N	26,48	N	30,14	N	12,07	%
40	N	42,93	N	36,27	N	40,00	N	8,33	%
50	N	54,19	N	47,12	N	49,69	N	7,07	%
60	N	63,98	N	54,19	N	59,86	N	8,16	%
70	N	74,42	N	65,05	N	69,91	N	6,69	%
80	N	84,70	N	76,64	N	79,98	N	5,04	%
90	N	94,33	N	85,86	N	89,92	N	4,71	%
100	N	103,78	N	96,13	N	99,84	N	3,83	%

Los resultados reflejan que a mayor tensión de deseada, es mayor la diferencia entre el valor máximo y mínimo en la respuesta del sistema, sin embargo, disminuye el porcentaje de oscilación de dicha respuesta respecto a la referencia.

Anteriormente, no existía un sistema de control que regule la tensión deseada, la fibra giraba libremente sobre las poleas registrando una tensión de 5 N, el procedimiento para conseguir una tensión diferente era frenar la polea que se encuentra en la cubeta de resina, obteniendo una tensión promedio de 20 N, las muestras para estos dos únicos valores posibles se registran en la Figura 4.19.

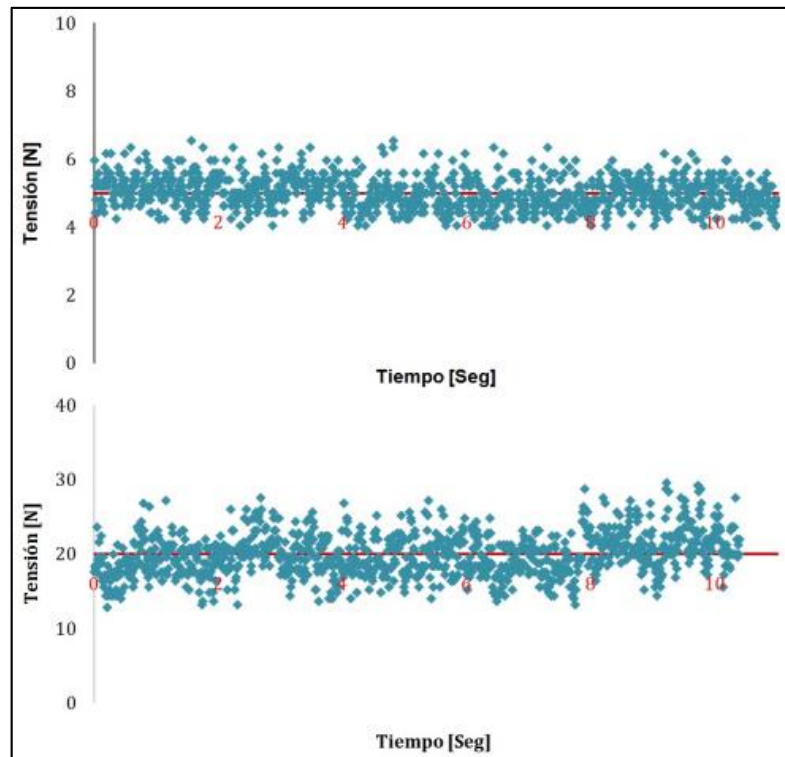


Figura 4.19. Tensión para polea en cubeta de resina frenada y móvil [21].

Si se hace una comparación entre los valores de tensión registrados y mostrados en la Figura 4.19, y los resultados de las muestras que se tomaron posteriormente a la implementación del sistema de control, se obtienen la Tabla 4.5, en ella se muestra que hay una mejora significativa para la tensión de 20N, reduciendo el porcentaje de oscilación respecto a la referencia en un 28,32%.

Tabla 4.5. Comparación antes y después para 20N y 5N.

	Tensión deseada	Valor máximo	Valor mínimo	% de oscilación respecto ref.
Antes	5 N (sin polea frenada)	6,2 N	4,0 N	22,00 %
	20 N (con polea frenada)	29,0 N	12,0 N	42,50 %
Ahora	5 N	6,66 N	3,78 N	28,80 %
	20 N	23,19 N	17,52 N	14,18 %

5. INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica se construyó con el programa Application Builder, versión 6.20, perteneciente a la suite de programas de Movitools.

Para el desarrollo, se identificaron las variables que el usuario puede modificar en la máquina, para determinar la velocidad y tiempo de funcionamiento de los motores, éstas son:

- Tensión de la fibra
- Ángulo de bobinado
- Número de capas del anillo
- Velocidad de curado del anillo
- Tiempo de curado del anillo

Para las variables que influyen en la etapa de bobinado del proceso, se creó una caja de texto para cada una de dentro de un panel llamado 'Configuración Inicial'; las cajas de texto de las variables que influyen en la etapa de curado se agregaron en un panel denominado 'Configuración del Curado'. Ambos paneles se ubicaron uno sobre otro en el lado izquierdo de la interfaz.

Para poder visualizar el estado del proceso, se creó un panel llamado 'Estado actual' que le permite observar al usuario el valor en tiempo real de las variables que influyen en el proceso de bobinado y curado del anillo, dicho panel se ubicó al lado derecho.

Bajo el panel de estado actual, se puso el panel de control donde el usuario escoge la etapa del proceso de la máquina bobinadora de hilos. La interfaz que contiene todos los paneles mencionados anteriormente se puede observar en la Figura 5.1.

MAQUINA BOBINADORA DE HILOS

Configuración Inicial

Tensión: N

Ángulo: °

No. Capas:

Configuración del Curado

Tiempo de Curado: min

Velocidad Curado: rpm

Estado Actual

Temperatura: °C

Tensión: N

Tiempo Curado: :

No. Capas:

Estado:

0: Pausa 2: Curado
1: Bobinado 3: Reset

Figura 5.1. Interfaz gráfica de usuario.

5.1. Panel de configuración inicial

El panel de configuración inicial permite modificar las variables críticas del proceso, las cuales inciden sobre la etapa de bobinado de hilos, y son: la tensión de la fibra, el ángulo de bobinado y el número de capas del anillo, este se puede observar en la Figura 5.2.

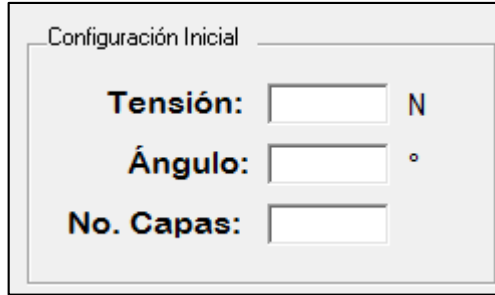
The image shows a software interface titled 'Configuración Inicial'. It contains three rows of controls. The first row is labeled 'Tensión:' followed by a text input box and the unit 'N'. The second row is labeled 'Ángulo:' followed by a text input box and the unit '°'. The third row is labeled 'No. Capas:' followed by a text input box.

Figura 5.2. Panel de configuración inicial.

Cuando el usuario ingresa la tensión deseada, en la caja de texto de tensión, se calcula un valor para un registro IPOS, mediante la **ecuación (7)** en otra caja de texto complementaria no visible para el usuario.

$$Palabra\ IPOS = 1 \cdot 10^6 \cdot 2 \frac{mV}{V} \cdot 12.16\ V \cdot \frac{T}{2KN} \quad (7)$$

Esta caja de texto complementaria se comunica con el elemento 'WritePar' de la estructura 'Mld2' de tipo MLDATA (ver Anexo 1), declarada en el programa principal del variador maestro, el variador se encarga mediante el bus de campo de modificar el parámetro 271 del variador esclavo el cual es el setpoint del controlador PID para el sistema de regulación de tensión de la máquina.

La caja de texto de ángulo de bobinado usa la misma lógica para comunicarse con el variador maestro que la caja de tensión, calcula la velocidad del carro móvil mediante la **ecuación (1)** en una caja de texto complementaria y ésta luego es enviada a la variable 'Velocidad_Carro', por ende, cada vez que el usuario cambie el ángulo de bobinado del anillo y el proceso esté en la etapa de bobinado, la velocidad del carro móvil cambia en función del ángulo establecido desde la interfaz.

$$N_s = \frac{2\pi r N_m}{L \tan(\theta)} \quad (1)$$

La caja de texto de número de capas se comunica directamente con el variador maestro y no realiza ninguna conversión del dato mediante cajas de texto complementarias, este valor, se escribe en la variable 'No_capas' y se disminuye cada vez que el carro móvil hace un desplazamiento horizontal de izquierda a derecha o de derecha a izquierda.

5.2. Panel de configuración de curado

El panel de configuración de curado mostrado en la Figura 5.3, permite modificar la velocidad del molde y su tiempo de movimiento. Su composición consta de dos cajas de texto.

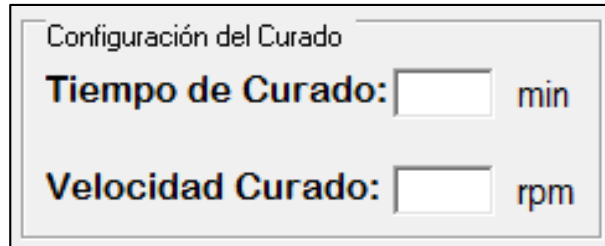
The image shows a graphical user interface window titled 'Configuración del Curado'. It contains two input fields. The first is labeled 'Tiempo de Curado:' followed by a text box and the unit 'min'. The second is labeled 'Velocidad Curado:' followed by a text box and the unit 'rpm'. The window has a light gray background and a thin border.

Figura 5.3. Panel de configuración de curado.

La primera caja de texto, que establece el tiempo de curado, está definiendo el tiempo en el que el molde va a girar a la velocidad de curado establecida, una vez terminado el tiempo de curado, el molde se detiene y el sistema vuelve al estado de reposo.

Esta caja se comunica con la variable '*Tiempo_Curado*', mediante una caja complementaria, ya que el valor digitado en minutos por el usuario debe ser convertido a milisegundos, para tener las mismas unidades del TIMER1 del variador maestro, y así, poder sobrescribir su valor cuando en el panel de control se pase a la etapa de curado como se explica en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.10.

La segunda caja de texto, de velocidad de curado, también es usada para el registro IPOS de velocidad del molde mediante una caja complementaria y la **ecuación (3)** mostrada a continuación.

$$Valor\ IPOS = Velocidad\ deseada[rpm] \cdot 21.3 \cdot \frac{16384}{Velocidad\ nominal\ motor\ molde\ [rpm]} \quad (3)$$

La caja complementaria, donde está el valor IPOS de velocidad, se comunica con la variable '*Velocidad_Curado*' y luego es enviada mediante el bus de campo al MOVITRAC LTE-B, cuando la máquina se encuentre en la etapa de curado.

5.3. Panel de estado actual

El panel de estado actual, mostrado en la Figura 5.4, le permite al usuario monitorear en tiempo real el proceso, mostrando el comportamiento de las variables que fijó para el anillo de etapa de bobinado y curado, todas las cajas de texto mostradas en este panel son de solo lectura y reciben sus respectivos valores del variador maestro.

Estado Actual

Temperatura: °C

Tensión: N

Tiempo Curado: :

No. Capas:

Figura 5.4. Panel de estado actual.

La caja de texto de temperatura se comunica con la estructura '*Analogica*', de tipo GSAINPUT, a través de una caja complementaria no visible, ésta realiza la conversión del valor del registro IPOS, que contiene la estructura al valor de temperatura real medido por la RTD mediante la **ecuación (4)**.

$$Temperatura [^{\circ}C] = 0.025 \cdot Registro\ IPOS - 25\ ^{\circ}C \quad (4)$$

La caja de tensión de fibra de este panel, convierte el valor de una caja complementaria no visible, que obtiene valor de la entrada análoga de la celda de carga del variador esclavo al valor actual de tensión de la fibra mediante la **ecuación (7)**. Para que la caja complementaria obtenga dicho valor, se comunica con el elemento 'ReadPar' de la estructura '*Mld*' de tipo MLDATA declarada en el programa principal, estructura que lee constantemente a través del bus de campo el valor de la entrada de la celda de carga usada en el sistema de tensión.

Las dos cajas de texto de tiempo de curado, permiten visualizar el tiempo restante que le falta al anillo para terminar la etapa de curado. La caja izquierda muestra los minutos restantes, esta se comunica con el TIMER1 del variador maestro, que contiene el valor de la cuenta descendente en milisegundos del tiempo definido por el usuario en el panel de 'Configuración de curado', y lo transforma para su correcta visualización mediante la **ecuación (8)**.

$$Minutos = \frac{TIMER1}{60000} \quad (8)$$

La caja derecha muestra los segundos restantes de la etapa de curado y de igual manera que la caja de texto de minutos, se comunica con el TIMER1 y transforma su valor mediante la **ecuación (9)** para la correcta visualización.

$$Segundos = \frac{TIMER1}{1000} - Minutos * 60 \quad (9)$$

Los valores obtenidos en la caja de minutos y segundos se le truncan los decimales, de esta manera se evita al reemplazar la **ecuación (8)** en la **ecuación (9)** el resultado sea siempre cero.

La caja de texto que indica el número de capas, se comunica directamente con la variable 'Contador_capas' del programa principal del variador maestro, así, se observa en tiempo real el número de capas que lleva el proceso en la etapa de bobinado.

5.4. Panel de control

El panel de control, de la interfaz gráfica mostrado en la figura 5.5, es aquel que da inicio a las etapas de fabricación de un anillo fibrorreforzado, la caja de texto que posee se comunica directamente con la variable '*ESTADO*' del variador maestro y solo es posible digitar 4 diferentes valores (0, 1, 2 y 3).

El panel de control es una interfaz gráfica con un fondo gris. En la parte superior, el texto "Estado:" está en color rojo y se encuentra a la izquierda de una caja de texto blanca rectangular. Debajo de esta, hay una cuadrícula de cuatro opciones: "0: Pausa" y "2: Curado" en la fila superior, y "1: Bobinado" y "3: Reset" en la fila inferior. Las opciones están distribuidas equidistantemente.

Figura 5.5. Panel de control.

Cuando el usuario define que la máquina esté en estado de Pausa (0), los motores de molde y del carro no tendrán movilidad y el programa principal del variador se encuentra en un ciclo infinito del cual solo es posible salir cambiando la variable '*ESTADO*'.

En el estado de bobinado (1), se da inicio a la primera etapa de la fabricación del anillo con los parámetros fijados en el panel de configuración inicial, una vez que el número de capas que se encuentra en el panel de estado actual llegue al valor de capas definido en el panel de configuración inicial, la máquina vuelve al estado de pausa y el valor en la caja de texto del panel de control vuelve a ser cero.

Cuando el usuario cambia al estado de curado (2), esta etapa inicia dejando el carro móvil fijo en la posición inicial y moviendo el molde a la velocidad y durante el tiempo establecido por el usuario en el panel de configuración de curado, una vez cumplido el tiempo establecido el cual se ve disminuir en el panel de estado actual, el valor de la caja de texto del panel de control automáticamente vuelve a (0) dejando la máquina en estado de pausa.

En la Figura 5.6 se muestra de manera general como las variables del variador maestro se comunican con la interfaz de usuario. Los nombres que están entre el computador y la interfaz representan como el usuario percibe las variables del proceso de bobinado de hilos, mientras que los nombres que están entre el variador y el computador son las variables que hacen parte del sistema montado en la máquina bobinadora.



Figura 5.6. Flujo de variables entre la interfaz de usuario y el variador maestro.

6. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL ANILLO Y RESULTADOS

6.1. Materiales requeridos y descripción del proceso

Para la construcción de un anillo fibrorreforzado se utilizaron los siguientes materiales:

- Fibra de carbono 12K.
- Resina Epoxi R-744.
- Endurecedor/catalizador E-2744.
- Desmoldante CP-500.

Inicialmente se unta una fina capa de desmoldante sobre las caras interiores del molde que estarán en contacto con la fibra de carbono, luego se procede a poner la fibra como se indica en la Figura 6.1.

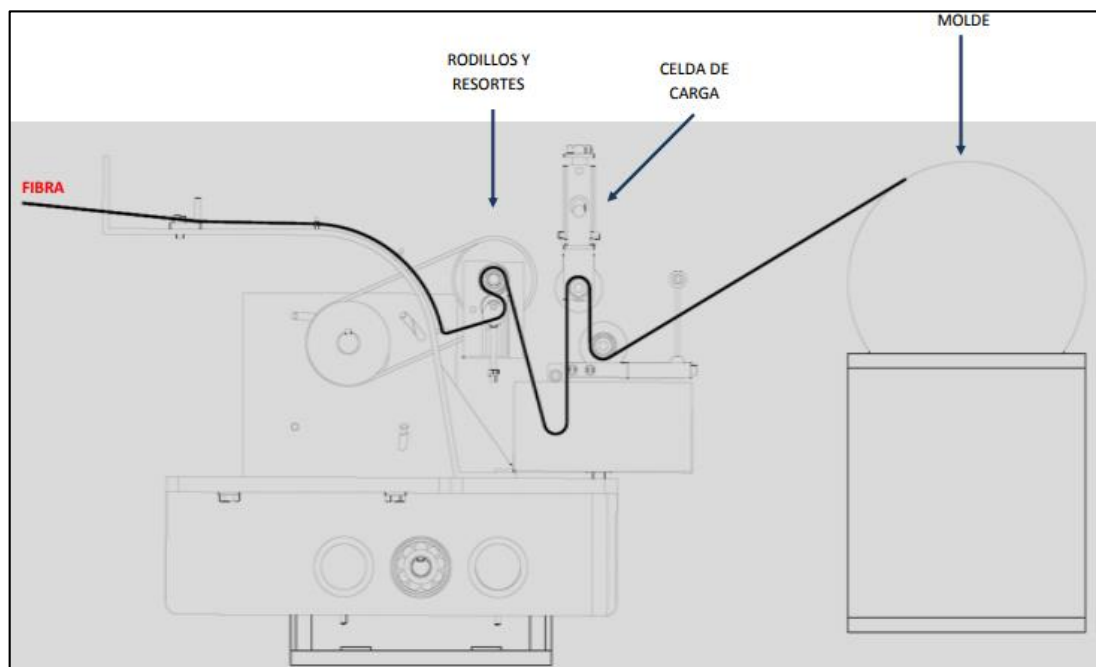
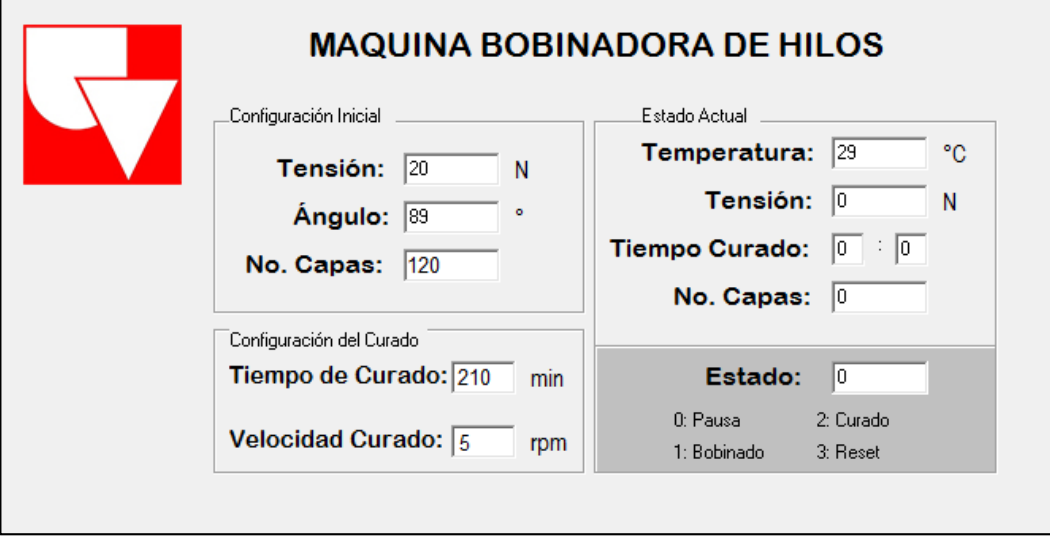


Figura 6.1. Posición de la fibra de carbono en la máquina bobinadora [21].

Después se procede a realizar la mezcla del endurecedor con la resina, según sea la proporción mencionada por el fabricante, en el caso de la resina 744 y endurecedor 2744 fabricados por la empresa SOLOQUIMICOS E.U., se utilizó la proporción que recomendaron de 10:2 (por cada 100 g de resina, 20 g de endurecedor).

Luego, se configuran las propiedades del anillo en la interfaz de usuario, como se observa en la Figura 6.2, y mediante esta misma se acciona la máquina cambiando

el estado de 0: Pausa a 1: Bobinado. La temperatura del proceso se ajustó en la pistola de calor y este procedimiento debe realizarse justo antes de poner la máquina en el estado de bobinado.



MAQUINA BOBINADORA DE HILOS

Configuración Inicial

Tensión: 20 N

Ángulo: 89 °

No. Capas: 120

Configuración del Curado

Tiempo de Curado: 210 min

Velocidad Curado: 5 rpm

Estado Actual

Temperatura: 29 °C

Tensión: 0 N

Tiempo Curado: 0 : 0

No. Capas: 0

Estado: 0

0: Pausa 2: Curado
1: Bobinado 3: Reset

Figura 6.2. Configuración inicial en la interfaz de usuario.

Después de haber completado el número de capas, puesto en la configuración inicial, el motor que hace girar al molde se detiene. En ese momento se debe cortar la fibra y poner el sistema en el estado de curado mediante la interfaz. Cuando inicia el estado 2, el tiempo de curado comienza a disminuir en el panel 'Estado Actual', cuando llega ese tiempo a cero la máquina vuelve a detenerse, se apaga la pistola de calor y se retira el molde, entonces se procede a sacar el anillo.

Luego de sacar el anillo, se observa que queda una capa de resina solidificada sobre el borde, como se muestra en la Figura 6.3. Para eliminar dicha capa de resina, y obtener el ancho definido inicialmente, se debe torneear por capas hasta llegar al ancho deseado, para dicho procedimiento se usó un torno mecánico Magnum Cut FI-1440GJZ, del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Universidad del Valle.



Figura 6.3. Anillo recién sacado del molde.

En la Figura 6.4 se observa el procedimiento de torneado del anillo y como queda su acabado luego de realizar dicho procedimiento.



Figura 6.4. Torneado del anillo y resultado final.

6.2. Resultados de pruebas mecánicas

Para verificar la repetibilidad del producto final, se hicieron 6 anillos fibrorreforzados, los cuales fueron sometidos a pruebas y comparados con los anillos fabricados anteriormente, fabricados en la tesis de maestría de Jimmy Penagos titulada '*Evaluación y análisis de anillos de fibra de carbono para sistemas de fijación externa*' [21].

Los parámetros de fabricación, que se usaron para la construcción de los anillos fibrorreforzados en [21], y en el trabajo de grado actual, se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros de fabricación usados en [21] y en el trabajo actual.

	Anillos realizados por Jimmy Penagos	Anillos realizados para el actual trabajo de grado
Tensión	20 N	20 N
Temperatura de bobinado	150 F	150 F
Temperatura de curado	150 F	150 F
Tiempo de curado	3:30 horas	3:30 horas
Ángulo de bobinado	-	89 °
Radio interno del anillo	80 mm	80 mm
Radio externo del anillo	100 mm	100 mm
Número de capas	-	120

6.2.1. Protocolo de pruebas

La ASTM F1541, es el estándar que define métodos de prueba en fijadores externos, entregando las pautas para caracterizar las propiedades mecánicas de los dispositivos, también identifica necesidades para un mejor desarrollo de los métodos de prueba y asegurar los criterios de rendimiento. Para elementos circulares de un fijador externo, como lo son los anillos tipo ilizarov, el estándar indica que se debe realizar una compresión radial sobre el anillo y medir su rigidez, entendiendo rigidez como la fuerza necesaria para doblar un anillo fibrorreforzado un milímetro.

El estándar fue usado en [21], donde definen un protocolo de pruebas, acogiéndose a las recomendaciones de la norma para probar los anillos realizados en ese trabajo de grado, dicho protocolo consiste en:

1. Aplicar una precarga al anillo.
2. Aplicar una carga mayor a la precarga y sostenerla durante 60 segundos.
3. Descargar para volver al valor de la precarga y sostener 10 segundos.

4. Repetir los pasos anteriores cinco veces.
5. Estimar los tiempos de inicio y final para cada carga aplicada dentro de los cinco ciclos.

Posteriormente, seleccionar el quinto ciclo de carga como se muestra en la Figura 6.5 (se selecciona el quinto ciclo de carga ya que el anillo presenta una mayor estabilidad en los resultados de las pruebas para ese momento) y para el intervalo de tiempo en el que se realiza la carga, estimar la curva de carga vs desplazamiento mostrada en la Figura 6.6.

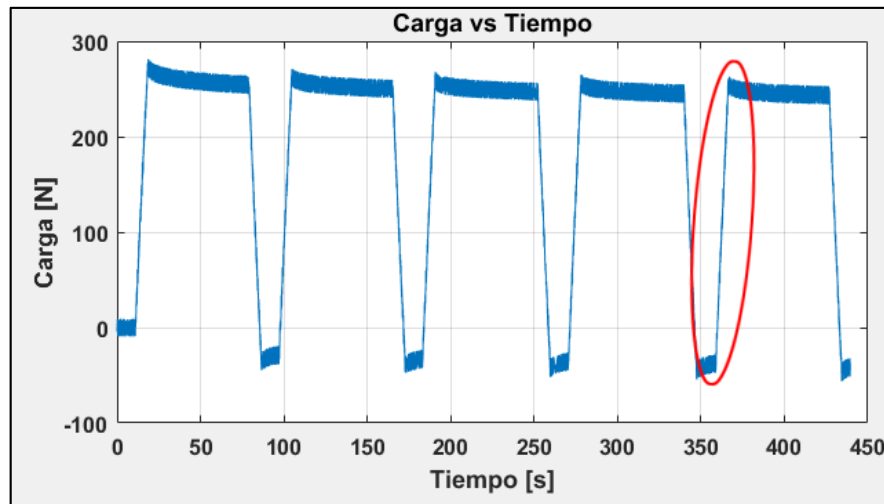


Figura 6.5. Línea de carga vs tiempo.

La Figura 6.6 indica el desplazamiento que hizo el anillo en el intervalo de tiempo de la quinta carga y la fuerza necesaria para realizar dicho desplazamiento.

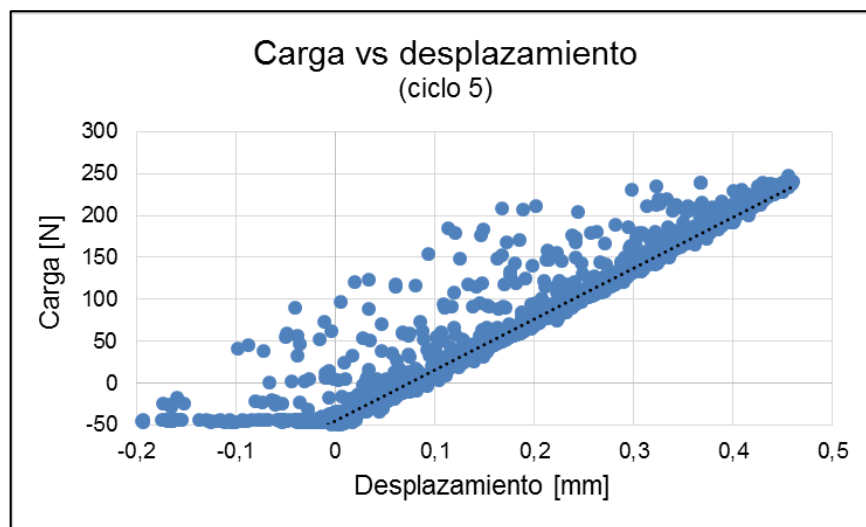


Figura 6.6. Línea de carga vs desplazamiento.

Finalmente, obtener la pendiente de la curva de carga vs desplazamiento (Figura 6.6), el valor de la pendiente es la rigidez del anillo dada en N/mm.

El protocolo de pruebas se ejecutó sobre los anillos fibrorreforzados para medir rigidez radial y rigidez a la flexión, en [21] no se especificaron valores de precarga y carga, por lo que se establecieron los valores mostrados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Valores de carga y precarga para pruebas de rigidez en los anillos.

Prueba de flexión	Precarga	200 N
	Carga	250 N
Prueba de compresión radial	Precarga	100 N
	Carga	1000 N

6.2.2. Prueba de flexión

Se sometieron los anillos bajo el protocolo de pruebas explicado anteriormente usando una celda de carga (Marca Omega LC703) de 300 Kg de capacidad máquina, y un transductor de desplazamiento lineal (LVDT), ambos conectados al ordenador mediante todo un sistema completo de medición para grabar y registrar los datos de carga y desplazamiento. La ubicación del anillo para esta prueba se puede ver en la Figura 6.7.

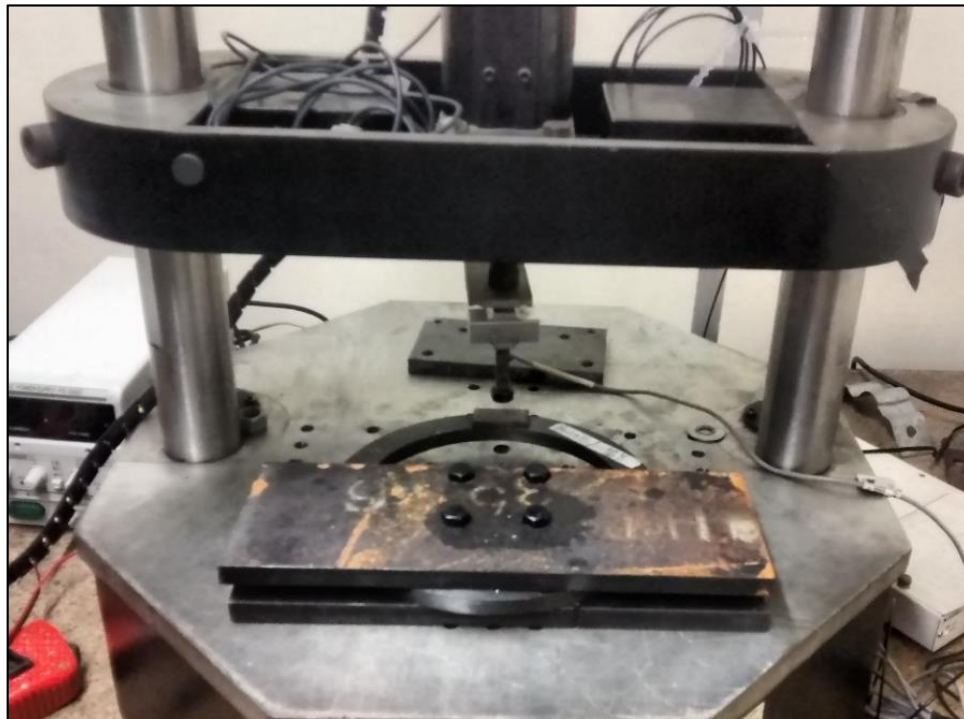


Figura 6.7. Ubicación del anillo para la prueba de flexión.

Los resultados se muestran en la Tabla 6.3:

Tabla 6.3. Resultados de la prueba de flexión.

Anillo	Rigidez [N/mm]
Anillo 05-07-17	614,54
Anillo 06-07-17	661,10
Anillo 08-07-17	612,18
Anillo 12-07-17	632,97
Anillo 13-07-17	658,29
Anillo 15-07-17	649,56

6.2.3. Prueba de compresión radial

Se procedió a realizar el mismo procedimiento ubicando el anillo verticalmente como se muestra en la Figura 6.8:



Figura 6.8. Ubicación del anillo para la prueba de compresión radial.

Se aplicó el protocolo de pruebas para todos los anillos y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Resultados de la prueba de compresión radial.

Anillo	Rigidez [N/mm]
Anillo 05-07-17	2519,00
Anillo 06-07-17	2457,10
Anillo 08-07-17	2207,00
Anillo 12-07-17	2353,50
Anillo 13-07-17	2268,40
Anillo 15-07-17	2294,70

6.2.4. Prueba de ruptura

Para esta prueba se tomó un anillo al azar, en este caso fue el anillo '06-07-17' y se le aplicó un incremento de carga como se muestra en la Figura 6.9 hasta determinar el punto en el que se comienza a romper las fibras del anillo deteriorándolo y dejándolo inservible como dispositivo médico. Para realizar la prueba se tuvo que utilizar una máquina que tuviera una capacidad de carga mayor a la que se utilizó en la prueba de compresión radial y flexión, en este caso se usó una máquina de compresión Humboldt HM-3000 cuya capacidad es de (10.000 libras). La ubicación del anillo en la máquina se observa en la Figura 6.10.

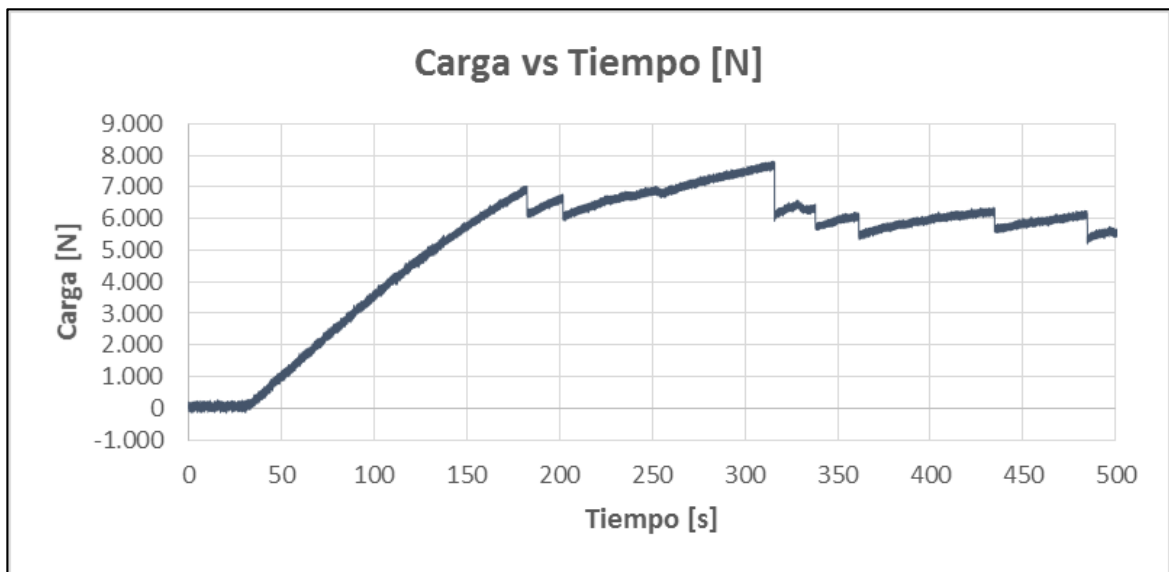


Figura 6.9. Prueba de ruptura.



Figura 6.10. Ubicación del anillo para la prueba de ruptura.

Se puede observar de la Figura 6.9 que cuando se llega alrededor de 7000 N, sucede una reducción inmediata de fuerza o, esto se debe a que en ese punto se comenzaron a romper las fibras en las capas anillo y éste comenzó a deformarse.

Los valores del punto de ruptura se muestran en la Tabla 6.5:

Tabla 6.5. Resultados de la prueba de ruptura.

Desplazamiento de Ruptura	2,23 mm
Carga de Ruptura	7031,90 N
Tiempo Ruptura	182,45 seg

La Figura 6.11 muestra en el círculo resaltado la fisura inicial provocada entre las capas de fibra de carbono del anillo, esta fisura se provocó en el segundo 182 de la prueba aplicada y ocasionó la reducción inmediata de fuerza indicada anteriormente.



Figura 6.11. Ruptura de las fibras.

6.3. Características finales de los anillos

En la fabricación de cada anillo fibrorreforzado se necesitó de 350 gramos de resina y 70 gramos de endurecedor para realizar la mezcla que va a la cubeta por donde pasa la fibra al realizar el baño de resina, se midieron las pérdidas de mezcla en el proceso de bobinado las cuales fueron aproximadamente de 360,58 gramos, por lo que la resina que contiene el anillo es aproximadamente de 59,42 gramos.

Una vez terminado el anillo se procedió a medir su peso siendo de 176,20 gramos, permitiendo estimar que el porcentaje de fibra en el anillo es aproximadamente de 66,27 %, en la Tabla 6.6 se encuentran las características finales de los anillos.

Tabla 6.6. Características finales de los anillos.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Porcentaje de fibra	66 %
Rigidez a la flexión	638 N
Rigidez radial	2350 N
Carga de ruptura	≥ 7000 N
Radio interno	80 mm
Radio externo	100 mm
Grosor del anillo	9,7 mm
Peso	176,20 g

6.4. Comparación entre anillos

6.4.1. Comparación con anillos realizados anteriormente en la máquina

Los anillos realizados en el trabajo de grado '*Evaluación y análisis de anillos de fibra de carbono para sistemas de fijación externa*' [21] con las características mencionadas en el punto 6.2 tiene como resultados a las pruebas de flexión y compresión radial los datos mostrados en la Tabla 6.7:

Tabla 6.7. Resultados a pruebas mecánicas de anillos realizados en 2012 [21].

	RIGIDEZ A LA FLEXIÓN	RIGIDEZ RADIAL
Anillo 1	165,9 N/mm	2219,00 N/mm
Anillo 2	183,3 N/mm	1831,50 N/mm
Anillo 3	153 N/mm	2308,30 N/mm

En la Tabla 6.8 se observa la recopilación de los resultados más significativos de las pruebas en los anillos realizados en el trabajo de grado de la referencia [21] en el año 2012 y los realizados en este trabajo de grado.

Tabla 6.8. Comparación de resultados entre anillos hechos en 2012 y 2017.

	RIGIDEZ A LA FLEXIÓN		RIGIDEZ RADIAL	
	2012	2017	2012	2017
Valor mínimo	153,00 N/mm	612,18 N/mm	1831,50 N/mm	2207,00 N/mm
Valor máximo	183,30 N/mm	661,10 N/mm	2308,30 N/mm	2519,00 N/mm
Mediana	165,90 N/mm	641,27 N/mm	2219,00 N/mm	2324,10 N/mm
Promedio	167,40 N/mm	638,11 N/mm	2119,60 N/mm	2349,95 N/mm
Desviación estándar (σ)	12,41	19,67	206,95	108,17
Desviación estándar porcentual	7,42%	3,08%	9,76%	4,60%

Se infiere de la tabla anterior que hay una mejora en el sistema ya que se garantiza que los anillos fibrorreforzados posean características más parecidas permitiendo que el proceso sea repetible. Cabe resaltar que los anillos realizados en 2012 con las características mencionadas en el punto 6.2 fueron muchos más, y se escogieron los tres mejores anillos que tuvieran mejor desempeño en las pruebas mecánicas, mientras que los anillos realizados en el 2017 se hicieron de manera continua y no hubo necesidad de realizar más anillos con las mismas características para obtener los resultados mostrados en la Tabla 6.3 y Tabla 6.4.

En la Figura 6.12 y la Figura 6.13 se muestra gráficamente los resultados de las pruebas de flexión y compresión radial, la diferencia de los valores en la prueba de

flexión entre anillos de 2012 y 2017 está alrededor de 470 N/mm, debido a que posiblemente la ubicación de los anillos en la prensa sea diferente en las pruebas realizadas en los distintos años, es difícil estimar la posición adecuada del anillo en este caso ya que no se documentó nada acerca de esto en el trabajo de grado realizado en 2012, sin embargo, la importancia de la prueba radica en la homogeneidad de los resultados.

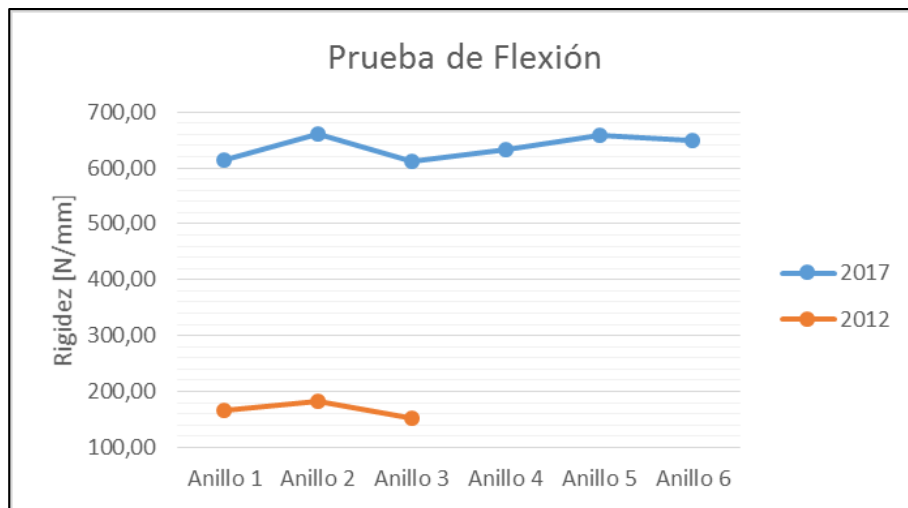


Figura 6.12. Comparación de rigidez en la prueba de flexión.

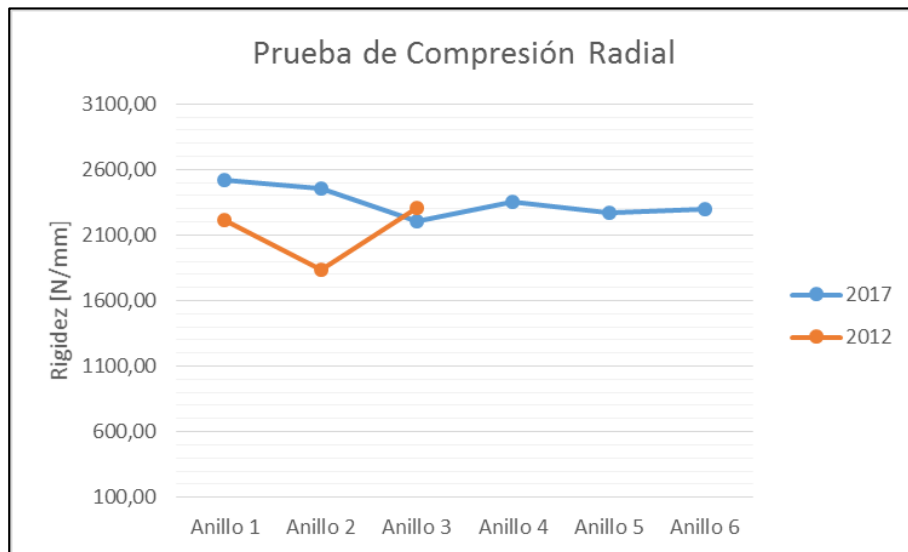


Figura 6.13. Comparación de rigidez en la prueba de compresión radial.

6.4.2. Comparación con anillos comerciales

Anteriormente se habían realizado pruebas de compresión radial en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle para anillos Ilizarov comerciales. En [30] se presenta los resultados de una prueba de compresión radial para un anillo Ilizarov genérico de 5/8", un anillo de polipropileno parte de un fijador externo desarrollado en cuba, un anillo de acero inoxidable fabricado en Brasil y un anillo de aluminio de sección cuadrada desarrollado como objetivo del trabajo de grado. Los resultados son mostrados en la Figura 6.14.

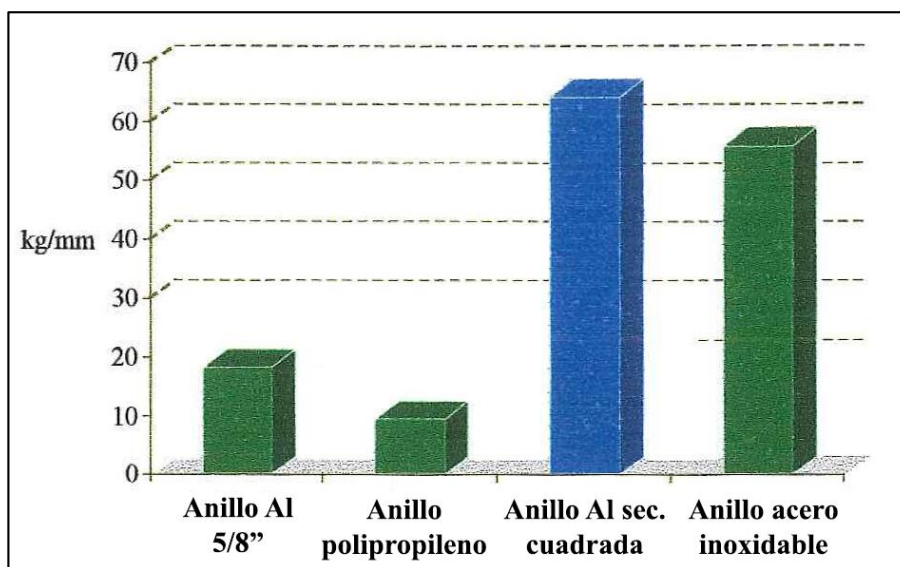


Figura 6.14.Comparación de rigidez entre anillos comerciales [30].

Se observa de la Figura 6.14 que para los anillos comerciales que están sombreados de color verde, el valor de rigidez radial no es mayor que 60 Kg/mm (588 N/mm), los anillos desarrollados en este trabajo de grado tienen una rigidez radial de 2349,95 N/mm, aproximadamente 4 veces el valor de rigidez de los anillos comerciales, por ende, se estima un mejor desempeño que los anillos comerciales en cuanto a rigidez radial y podrían hacer parte de un sistema de fijación externa comercial.

6.5. Estimación de gasto de material por anillo.

Para estimar el costo de la fibra de carbono se hace una cotización por internet en la página *wholesaler.alibaba.com*, El costo de 4 Kg de fibra de carbono de 12K a Colombia en pesos es de 328.288 COP [31]. El costo del kilo de resina R-744 es de 31.500 COP y del kilo de endurecedor E-2744 es de 45.000 COP (todos los precios cotizados en febrero de 2018).

El costo total de los elementos para hacer un anillo en fibra de carbono en la máquina bobinadora de hilos es de 23.777 COP y el detalle se resume en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9. Costo de materia prima por anillo.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Resina R-744	350 g	11.025 COP
Endurecedor E-2744	70 g	3.150 COP
Fibra de Carbono	117 g	9.602 COP
TOTAL		23.777 COP

7. CONCLUSIONES

Se identificaron como variables críticas de fabricación, para anillos fibrorreforzados, las siguientes: tensión de la fibra, ángulo de bobinado, temperatura de curado y bobinado y número de capas, y se estableció que sus rangos de operación son los mostrados en la Tabla 2.5.

Al restringir el ángulo de bobinado entre 87 y 89°, se asegura un patrón de las fibras de tipo aro, de esta manera se garantiza mayor rigidez radial en el anillo, ajustándose mejor a las necesidades del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para hacer pruebas con materiales fibrorreforzados usados en dispositivos médicos.

El algoritmo implementado, el cual se muestra en la Figura 3.11, fija una velocidad de 4 rpm sobre el molde del anillo, permitiendo un porcentaje de oscilación en tensión de 14% para los anillos fabricados a 20 N, sin embargo, el hecho de escoger la menor velocidad posible, sobre la etapa de bobinado, hace que el tiempo de esta etapa sea de hora y media aproximadamente.

El sistema de tensión posee un ruido inherente que tiene mayor impacto sobre tensiones de referencia menores a 20 N, en la Tabla 4.4 se puede observar como el porcentaje de oscilación sobre la tensión de la fibra es inversamente proporcional a la tensión de referencia, sin embargo, este comportamiento es positivo, ya que a una mayor tensión constante se obtiene una mejor compactación en las fibras y una mayor rigidez en los anillos fibrorreforzados.

Se realizaron las pruebas mecánicas bajo un protocolo de carga basado en el estándar ASTM F1541, esta metodología permitió la comparación directa con los anillos fibrorreforzados realizados en [21] y anillos comerciales estudiados en [30].

Se determinó que los anillos realizados después de automatizar el proceso, tienen una rigidez promedio mayor en 230,35 N/mm y una desviación estándar porcentual de 5,16%, menor respecto a los anillos fabricados anteriormente. Además, tienen una rigidez radial promedio mayor en 1761,95 N/mm, comparándolos con los anillos comerciales, estos datos permiten afirmar que la máquina permite fabricar anillos homogéneos con mejores características que los anteriores, y son aptos para usarlos como parte de un dispositivo fijador externo para fracturas óseas.

Con el sistema actual de tensión funcional, en la máquina bobinadora, permite, al Grupo de Investigación de Mejoramiento Industrial (GIMI), realiza un mejor estudio de los materiales fibrorreforzados, dándoles la posibilidad de variar la tensión en un rango de 0 a 100 N, donde anteriormente solo se contaba con la opción de fabricar anillos a 5 N y 20 N.

8. TRABAJO FUTURO

El desarrollo de este proyecto, permite la reactivación de la máquina bobinadora de hilos, en el laboratorio de materiales fibrorreforzados, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Universidad del Valle, garantizando la fabricación de anillos fibrorreforzados homogéneos.

Se consideran dos líneas de trabajo futuro, para dar continuidad a este trabajo de grado:

La primera, se enfoca en mejoras del sistema electrónico, para aprovechar al máximo la funcionalidad de la máquina, así:

- Implementación de un algoritmo e interfaz gráfica que permita fabricar elementos cilíndricos basados en fibra tales como tubos fibrorreforzados.
- Implementación de un controlador de tensión basado en la caracterización de la planta, esto con el fin de obtener una respuesta a una variable crítica del proceso con menor porcentaje de oscilación respecto a la referencia.

La segunda, se enfoca en el estudio mecánico de los anillos fibrorreforzados en la máquina bobinadora. A lo largo de este trabajo de grado, se extrajeron los aspectos mecánicos más importantes de los parámetros de fabricación y las características medibles en el producto final, sin embargo, no se profundizó en ello puesto que el enfoque dado al proyecto fue la automatización y puesta en marcha de la máquina, para obtener un producto final repetible. Siendo así, se considera apropiado realizar los siguientes proyectos:

- Estudio de la influencia mecánica de la variación de parámetros de fabricación para anillos fibrorreforzados.
- Construcción y evaluación de un sistema fijador externo basado en anillos fibrorreforzados tipo Ilizarov.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Groover P., *Fundamentos de manufactura moderna*, Pretince-. Pretince - Hall, 1997.
- [2] F. C. Shen, "A filament-wound structure technology overview," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 42, no. 2, pp. 96–100, 1995.
- [3] A. Javier and V. Domínguez, "Proceso de conformado de pieles estructurales transparentes," 2014.
- [4] F. H. Abdalla, S. A. Mutasher, Y. A. Khalid, S. M. Sapuan, A. M. S. Hamouda, B. B. Sahari, and M. M. Hamdan, "Design and fabrication of low cost filament winding machine," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 1, pp. 234–239, 2007.
- [5] C. Cavette, "Background of Carbon Fiber." [Online]. Available: <http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>.
- [6] B. A. Newcomb, "Composites : Part A Processing , structure , and properties of carbon fibers," vol. 91, pp. 262–282, 2016.
- [7] M. K. & H. Rong, "CARBON FIBERS," 2004. [Online]. Available: <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/CARBON FIBERS.htm>.
- [8] Universidad del País Vasco, "Tema 2: Materiales compuestos de matriz orgánica: Constituyentes," pp. 1–4.
- [9] AllStudies, "Resinas Epoxi," *Resinas Epoxi*. [Online]. Available: <http://allstudies.com/resinas-epoxi.html>.
- [10] S. C. Dai and L. Ye, "Characteristics of CF/PEI tape winding process with on-line consolidation," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 9, pp. 1227–1238, 2002.
- [11] N. J. Dosman Rivera, "Diseño y construcción de una maquina para fabricar piezas en fibra de carbono en forma de solidos de revolución," Universidad del Valle, 2009.
- [12] C. Pinedo, J. López, and N. Dosman, "HILOS PARA CONSTRUIR ELEMENTOS ESTRUCTURALES UTILIZANDO MATERIAL FIBRO-REFORZADO DEVELOPMENT OF A FILAMENT WINDING MACHINE TO BUILD STRUCTURAL ELEMENTS USING FIBROREINFORCED MATERIAL."
- [13] SEW EURODRIVE, *MOVIDRIVE MDX60B/61B Instrucciones de funcionamiento y mantenimiento*. 2010.
- [14] Crowcon, "MOVITRAC LTE-B Instrucciones de funcionamiento y mantenimiento," p. 80, 2012.
- [15] OMEGA, "General Purpose Industrial-Grade RTD Sensors (Class B)."
- [16] STEINEL, "Catalogo de pistolas de aire caliente STEINEL," p. 18.

- [17] EBCHQ, "2 Wire Temp. Transmitter."
- [18] Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd., "Celda de Carga TML TCLZ 2KNA." [Online]. Available: http://www.tml.jp/e/product/transducers/general/load_cell/tens_compress/tclz.html.
- [19] B. Modules, L. Cell, I. Modules, F. Configurable, and S. Ranges, "DIN Rail Mount Configurable Signal Conditioners," pp. 76–86.
- [20] P. Mertiny and F. Ellyin, "Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 12, pp. 1615–1622, 2002.
- [21] Jose Jimmy Penagos, "Evaluación y análisis de anillos de fibra de carbono para sistemas de fijación externa," Universidad del Valle.
- [22] G. Patel and C. K. Patil, "STUDY OF MANDREL EXTRACTOR," *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, pp. 24–31, 2016.
- [23] S. Mutasher, N. Mir-nasiri, and L. E. E. C. Lin, "SMALL-SCALE FILAMENT WINDING MACHINE FOR PRODUCING FIBER COMPOSITE PRODUCTS 2 . Mechanical and Electrical Setup of Winding Machine," vol. 7, no. 2, pp. 156–168, 2012.
- [24] F. B. Álvarez, "Estratificados y composites, procesamiento de materiales compuestos." 2014.
- [25] SEW EURODRIVE, "Positioning and Sequence Control (Ipos)," vol. 11, 2004.
- [26] SEW EURODRIVE, "MOVIDRIVE ® Serial Communication SEW-EURODRIVE," 2001.
- [27] OMEGA, "USER ' S Guide DRF-LC," 2000.
- [28] J. M. Ramírez S., *Sistemas de Control*. Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2014.
- [29] U. de Valladolid, "Sintonía de reguladores PID," *Reguladores PID*, 1999.
- [30] P. A. Lasso Argote, "Diseño, construcción y evaluación de un fijador externo ilizarov para tratamiento de trauma de tibia," Universidad del Valle, 2001.
- [31] Alibaba, "12K/24K Carbon Fiber Roving Filament Carbon Yarn," *Textiles & Leather Products*, 2017. [Online]. Available: https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/12K-24K-Carbon-Fiber-Roving-Filament_60571779987.html.

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de las estructuras usadas para el control del carro móvil y el mandril [25].

Llamado	Estructura	Elementos	Descripción
_SetSys	SSPOSSPEED	CW	Positioning speed CW (0.1 U/min)
		CCW	Positioning speed CCW (0.1 U/min)
_MoviLink	MOVLNK	Bus types	Possible bus types: ML_BT_S0: S0 (RS485 #1) ML_BT_S1: S1 (RS485 #2) ML_BT_SBUS: SBus
		Address	Single address (0...99) or group address (100...199)
		Format	Specification of the process (PD) and parameter (PARAM) channels for data transfer: ML_FT_PAR1: PARAM+1PD ML_FT_1: 1PD ML_FT_PAR2: PARAM+2PD ML_FT_2: 2PD ML_FT_PAR3: PARAM+3PD ML_FT_3: 3PD ML_FT_PAR: Parameter (without PD)
		Service	Communication service ML_S_RD: Read service ML_S_WR: Write with storage in non-volatile memory ML_S_WRV: Writing without saving
		Index	Index number of the parameter to be modified or read (s. parameter index directory)
		DPointer	Number of the variable from which the read data is stored or from which the data to be written is obtained (structure MLDATA)
		Result	Contains the error code after the parameter service has been executed, or contains zero if there was no error
	MLDATA	WritePar	Parameter that is sent for write services
		ReadPar	Parameter that is sent for read services
		PO1	Process output data 1
		PO2	Process output data 2
		PO3	Process output data 3
		PI1	Process input data 1
		PI2	Process input data 2
		PI3	Process input data 3